SEAN CARROLL

ALGO PROFUNDAMENTE OCULTO

MUNDOS CUÁNTICOS Y LA EMERGENCIA DEL ESPACIO TIEMPO

Índice

Título
Contenido
Prólogo: No tengas miedo
Primera parte: Espeluznante
1Qué está pasando: Mirando el mundo cuántico
2La formulación valiente: Mecánica cuántica austera
3¿Por qué alguien pensaría esto? Cómo llegó a ser la mecánica cuántica
4Lo que no puede ser conocido, porque no existe: Incertidumbre y complementariedad
5 Enredado en el azul: Funciones de onda de muchas partes
Segunda parte: Dividir
6 Dividiendo el Universo: Decoherencia y mundos paralelos
7 Orden y Aleatoriedad: De dónde viene la probabilidad
8¿Este compromiso ontológico me hace parecer gorda? Un diálogo socrático sobre los rompecabezas cuánticos
9otras maneras: Alternativas a muchos mundos
10El lado humano: Vivir y pensar en un universo cuántico
Tercera parte: El espacio tiempo
11¿Por qué hay espacio? Emergencia y Localidad
12Un mundo de vibraciones: Teoría de Campo Cuántico
13Respirar en el espacio vacío: Encontrar la gravedad dentro de la Mecánica Cuántica
14Más allá del espacio y el tiempo: Holografía, agujeros negros y los límites de la localidad
Epílogo: Todo es cuántico
Apéndice: La historia de las partículas virtuales
Agradecimientos
Más lecturas
Referencias
Índice
Derechos de autor

MÁS ELOGIOS PARA *ALGO PROFUNDAMENTE OCULTO*

"Sean Carroll siempre está lúcido y es divertido, gratificantemente legible, mientras sigue excavando profundidades. Él aboga por una aceptación de la mecánica cuántica en su más mínimo, su más austero atractivo para el encanto de lo prístino. La consecuencia es la aniquilación de nuestras nociones convencionales de realidad en favor de un mundo completamente surrealista de muchos mundos. Sean nos incluye en la batalla entre una simple realidad contra una multitud de realidades que se siente apenas en la periferia de la comprensión humana. Nos incluye en las ideas, la filosofía y el fomento de la revolución. Un libro fascinante e importante".

-Janna Levin, profesora de física y astronomía en el Barnard College y autora de *Black Hole Blues*

"Sean Carroll aclara maravillosamente el debate sobre los fundamentos de la mecánica cuántica y defiende el enfoque más elegante y valiente: la asombrosa interpretación de 'Muchos Mundos'. Sus explicaciones de sus pros y contras son claras, imparciales y filosóficamente ingeniosas".

-Steven Strogatz, profesor de matemáticas en la Universidad de Cornell y autor de "*Infinite Powers".*

"Carroll nos da un asiento en primera fila para el desarrollo de una nueva visión de la física: una que conecta nuestras experiencias cotidianas con un vertiginoso universo de salón de espejos en el que nuestro propio sentido del yo se ve desafiado. Es una idea fascinante y una que podría dar pistas para una realidad más profunda".

-Katie Mack, astrofísica teórica de la Universidad Estatal de Carolina del Norte y autora del próximo libro *The End of Everything (El fin de todo)*

"Me sentí abrumado por las lágrimas de alegría al ver tantos temas fundamentales explicados tan bien como nunca antes. *Algo Profundamente Oculto* es una obra maestra, que junto con el *QED* de Feynman es una de las dos mejores popularizaciones de la mecánica cuántica que he visto. Y si clasificamos el *QED con* diferentes objetivos, entonces es la mejor popularización de la mecánica cuántica que he visto, punto."

-Scott Aaronson, profesor de informática de la Universidad de Texas en Austin y director del Centro de Información Cuántica de la UT.

"Irresistible y un absoluto placer para leer. Si bien este es un libro sobre algunos de los más profundos misterios actuales de la física, también es un libro sobre metafísica, ya que Carroll nos guía lúcidamente sobre cómo no sólo pensar en la verdadera y oculta naturaleza de la realidad, sino también en cómo darle sentido. Me encantó este libro".

-Priyamvada Natarajan, astrofísico teórico de la Universidad de Yale y autor de "*Mapping the Heavens".*

ALGO PROFUNDAMENTE ESCONDIDO

TAMBIÉN POR SEAN CARROLL

Desde la eternidad hasta aquí

La partícula en el fin del universo

El cuadro general

ALGO PROFUNDAMENTE ESCONDIDO

Los mundos cuánticos y el surgimiento del espacio-tiempo

SEAN CAROLL

ONEWORLD

A los pensadores a lo largo de la historia que se aferraron a
sus armas por
las razones correctas

CONTENIDO

Prólogo: No tengas miedo

Primera parte
SPOOKY

1¿Qué está pasando? Mirando el mundo cuántico

2La formulación valiente: Mecánica cuántica austera

3¿Por qué alguien pensaría esto? Cómo llegó a ser la mecánica cuántica

4Lo que no puede ser conocido, porque no existe: La incertidumbre y la complementariedad

5Enredado en el azul: Funciones de onda de muchas partes

Segunda parte
SPLITTING

6Dividiendo el Universo: Decoherencia y mundos paralelos

7Orden y Aleatoriedad: De dónde viene la probabilidad

8¿Este compromiso ontológico me hace parecer gorda? Un diálogo socrático sobre los rompecabezas cuánticos

9Otras formas: Alternativas a muchos mundos

10El lado humano: Vivir y pensar en un universo cuántico

Tercera parte
SPACETIME

11¿Por qué hay espacio? Emergencia y Localidad

12Un mundo de vibraciones: Teoría de Campo Cuántico

13Respirando en el espacio vacío: Encontrar la gravedad dentro de la Mecánica Cuántica

14Más allá del espacio y el tiempo: La holografía, los agujeros negros y los límites de la localidad

Epílogo: Todo es cuántico

Apéndice: La historia de las partículas virtuales

Agradecimientos
Más lecturas
Referencias
Índice

ALGO PROFUNDAMENTE ESCONDIDO

PROLOGUE

No tengas miedo

No se necesita un doctorado en física teórica para tener miedo de la mecánica cuántica. Pero no duele.

Eso puede parecer extraño. La mecánica cuántica es nuestra mejor teoría del mundo microscópico. Describe cómo los átomos y las partículas interactúan a través de las fuerzas de la naturaleza, y hace predicciones experimentales increíblemente precisas. Para estar seguros, la mecánica cuántica tiene algo de reputación de ser difícil, misteriosa, justo este lado de la magia. Pero los físicos profesionales, de todas las personas, deberían estar relativamente cómodos con una teoría como esa. Constantemente están haciendo intrincados cálculos que involucran fenómenos cuánticos, y construyendo máquinas gigantes dedicadas a probar las predicciones resultantes. Seguramente no estamos sugiriendo que los físicos han estado fingiendo todo este tiempo.

No han estado fingiendo, pero tampoco han sido exactamente honestos consigo mismos. Por un lado, la mecánica cuántica es el corazón y el alma de la física moderna. Astrofísicos, físicos de partículas, físicos atómicos, físicos láser... todos usan la mecánica cuántica todo el tiempo, y son muy buenos en ello. No es sólo una cuestión de investigación esotérica. La mecánica cuántica es omnipresente en la tecnología moderna. Semiconductores, transistores, microchips, láseres y memoria de ordenador, todos dependen de la mecánica cuántica para funcionar. Para ello, la mecánica cuántica es necesaria para dar sentido a las características más básicas del mundo que nos rodea. Esencialmente toda la química es una cuestión de mecánica cuántica aplicada. Para entender cómo brilla el sol, o por qué las mesas son sólidas, se necesita la mecánica cuántica.

Imagina que cierras los ojos. Esperemos que las cosas se vean bastante oscuras. Puede que pienses que tiene sentido, porque no entra ninguna luz. Pero eso no es del todo correcto; la luz infrarroja, con una longitud de onda ligeramente más larga que la luz visible, es emitida todo el tiempo por cualquier objeto caliente, y eso incluye a tu propio cuerpo. Si nuestros ojos fueran tan sensibles a la luz infrarroja como a la visible, nos cegarían incluso con los párpados cerrados, por toda la luz emitida por nuestros propios ojos. Pero las barras y conos que actúan como receptores de luz en nuestros ojos son inteligentemente sensibles a la luz visible, no a la infrarroja. ¿Cómo lo hacen? En última instancia, la respuesta se reduce a la mecánica cuántica.

La mecánica cuántica no es mágica. Es la visión más profunda y completa de la realidad que tenemos. Por lo que sabemos actualmente, la mecánica cuántica no es sólo una aproximación a la verdad; es la verdad. Está sujeta a cambios ante resultados experimentales inesperados, pero hasta ahora no hemos visto indicios de tales sorpresas. El desarrollo de la mecánica cuántica en los primeros años del siglo XX, con nombres como Planck, Einstein, Bohr, Heisenberg, Schrödinger y Dirac, nos dejó en 1927 con una comprensión madura que es seguramente uno de los mayores logros intelectuales de la historia de la humanidad. Tenemos todas las razones para estar orgullosos.

Por otro lado, en las memorables palabras de Richard Feynman, "Creo que puedo decir con seguridad que nadie entiende la mecánica cuántica". *Utilizamos la mecánica cuántica* para diseñar nuevas tecnologías y predecir los resultados de los experimentos. Pero los físicos honestos admiten que no *entendemos* realmente la mecánica cuántica. Tenemos una receta que podemos aplicar con seguridad en ciertas situaciones prescritas, y que nos devuelve predicciones alucinantes y precisas que han sido triunfalmente reivindicadas por los datos. Pero si quieres profundizar y preguntar qué está pasando realmente, simplemente no lo sabemos. Los físicos tienden a tratar a la mecánica cuántica como un robot sin mente en el que confían para realizar ciertas tareas, no como un amigo querido que les importa a nivel personal.

Esta actitud entre los profesionales se filtra en cómo la mecánica cuántica se explica al mundo. Lo que nos gustaría hacer es presentar una imagen totalmente formada de la Naturaleza, pero no podemos hacerlo, ya que los físicos no están de acuerdo con lo que la mecánica cuántica dice en realidad. En cambio, los tratamientos populares tienden a enfatizar que la mecánica cuántica es misteriosa, desconcertante, imposible de entender. Ese mensaje va en contra de los principios básicos que la ciencia defiende, que incluyen la idea de que el mundo es fundamentalmente inteligible. Tenemos una especie de bloqueo mental cuando se trata de la mecánica cuántica, y necesitamos un poco de terapia cuántica para ayudar a superarlo.

Cuando enseñamos la mecánica cuántica a los estudiantes, se les enseña una lista de reglas. Algunas de las reglas son de tipo familiar: hay una descripción matemática de los sistemas cuánticos, además de una explicación de cómo evolucionan dichos sistemas a lo largo del tiempo. Pero hay un montón de reglas adicionales que no tienen analogía en ninguna otra teoría de la física. Estas reglas adicionales nos dicen lo que sucede cuando *observamos* un sistema cuántico, y ese comportamiento es completamente diferente de cómo se comporta el sistema cuando no lo observamos. ¿Qué demonios está pasando con eso?

Hay básicamente dos opciones. Una es que la historia que hemos estado contando a nuestros estudiantes es lamentablemente incompleta, y para que la mecánica cuántica pueda calificarse como una teoría sensata necesitamos entender qué es una "medida" u "observación", y por qué parece tan diferente de lo que el sistema hace de otra manera. La otra opción es que la mecánica cuántica representa una ruptura violenta con la forma en que siempre hemos pensado antes en la física, pasando de una visión en la que el mundo existe objetivamente e independientemente de cómo lo percibimos, a una en la que el acto de observación es de alguna manera fundamental para la naturaleza de la realidad.

En cualquier caso, los libros de texto deberían por todos los derechos pasar tiempo explorando estas opciones, y admitir que aunque la mecánica cuántica es extremadamente exitosa, no podemos afirmar que hayamos terminado de desarrollarla todavía. No lo hacen. En su mayor parte, pasan por alto este tema en silencio, prefiriendo permanecer en la zona de confort del físico de escribir ecuaciones y desafiar a los estudiantes a resolverlas.

Eso es vergonzoso. Y se pone peor.

Se podría pensar, dada esta situación, que la búsqueda de la comprensión de la mecánica cuántica sería el mayor objetivo de toda la física. Millones de dólares en subvenciones fluirían a los investigadores de las fundaciones cuánticas, las mentes más brillantes acudirían en masa al problema, y los conocimientos más importantes serían recompensados con premios y prestigio. Las universidades competirían por contratar a las figuras líderes en el área, colgando los salarios de las superestrellas para atraerlas de las instituciones rivales.

Lamentablemente, no. La búsqueda de sentido a la mecánica cuántica no sólo no se considera una especialidad de alto nivel dentro de la física moderna, sino que en muchos sectores se considera apenas respetable en absoluto, si no activamente desacreditada. La mayoría de los departamentos de física no tienen a nadie trabajando en el problema, y aquellos que eligen hacerlo son mirados con sospecha. (Recientemente, mientras escribía una propuesta de subvención, se me aconsejó que me concentrara en describir mi trabajo en gravitación y cosmología, que se considera legítimo, y que guardara silencio sobre mi trabajo en los fundamentos de la mecánica cuántica, ya que eso me haría parecer menos serio). Ha habido importantes avances en los últimos noventa años, pero normalmente han sido realizados por personas testarudas que pensaban que los problemas eran importantes a pesar de lo que les decían todos sus colegas, o por jóvenes estudiantes que no sabían nada mejor y que más tarde abandonaron el campo por completo.

En una de las fábulas de Esopo, un zorro ve un jugoso racimo de uvas y salta para alcanzarlo, pero no puede saltar lo suficientemente alto. En su frustración declara que las uvas probablemente estaban agrias, y que nunca las quiso de todas formas. El zorro representa a los "físicos", y las uvas "entienden la mecánica cuántica". Muchos investigadores han decidido que entender cómo funciona realmente la naturaleza nunca fue realmente importante; todo lo que importa es la capacidad de hacer predicciones particulares.

Los científicos están capacitados para valorar resultados tangibles, ya sean hallazgos experimentales apasionantes o modelos teóricos cuantitativos. La idea de trabajar para comprender una teoría que ya tenemos, incluso si ese esfuerzo no conduce a ninguna nueva tecnología o predicción específica, puede ser difícil de vender. La tensión subyacente fue ilustrada en el programa de televisión *The Wire*, donde un grupo de detectives muy trabajadores trabajaron durante meses para reunir meticulosamente pruebas que permitieran construir un caso contra una poderosa red de narcotráfico. Sus jefes, mientras tanto, no tenían paciencia para tal frivolidad incremental. Sólo querían ver drogas en la mesa para su próxima conferencia de prensa, y animaron a la policía a golpear cabezas y hacer arrestos ostentosos. Las agencias de financiación y los comités de contratación son como esos jefes. En un mundo donde todos los incentivos nos empujan hacia resultados concretos y cuantificables.

Este libro tiene tres mensajes principales. El primero es que la mecánica cuántica debería ser comprensible -aunque no estemos allí todavía- y lograr tal comprensión debería ser un objetivo

prioritario de la ciencia moderna. La mecánica cuántica es única entre las teorías físicas en cuanto a la distinción aparente entre *lo que vemos* y *lo que realmente es*. Esto plantea un desafío especial a las mentes de los científicos (y de todos los demás), que están acostumbrados a pensar en lo que vemos como "real" sin problemas, y a trabajar para explicar las cosas en consecuencia. Pero este desafío no es insuperable, y si liberamos nuestras mentes de ciertas formas de pensar anticuadas e intuitivas, encontramos que la mecánica cuántica no es desesperadamente mística o inexplicable. Es sólo física.

El segundo mensaje es que hemos hecho un verdadero progreso hacia el entendimiento. Me centraré en el enfoque que creo que es claramente la ruta más prometedora, la formulación de la mecánica cuántica de Everett o de muchos mundos. Muchos Mundos ha sido acogida con entusiasmo por muchos físicos, pero tiene una reputación poco clara entre la gente que se desanima por la proliferación de otras realidades que contienen copias de sí mismas. Si usted es una de esas personas, quiero al menos convencerle de que Muchos Mundos es la forma *más pura* de dar sentido a la mecánica cuántica, es donde terminamos si seguimos el camino de la menor resistencia al tomar los fenómenos cuánticos en serio. En particular, los múltiples mundos son predicciones del formalismo que ya existe, no algo añadido a mano. Pero Múltiples mundos no es el único enfoque respetable, y mencionaremos algunos de sus principales competidores. (Me esforzaré por ser justo, si no necesariamente equilibrado.) Lo importante es que los diversos enfoques son todas teorías científicas bien construidas, con ramificaciones experimentales potencialmente diferentes, no sólo "interpretaciones" de cabeza hueca que se debatirán sobre el coñac y los puros después de que hayamos terminado de hacer el trabajo real.

El tercer mensaje es que todo esto importa, y no sólo para la integridad de la ciencia. El éxito hasta la fecha del actual marco adecuado, pero no perfectamente coherente, de la mecánica cuántica no debería cegarnos al hecho de que hay circunstancias en las que tal enfoque simplemente no está a la altura de la tarea. En particular, cuando pasamos a comprender la naturaleza del propio espacio tiempo, y el origen y destino final del universo entero, los fundamentos de la mecánica cuántica son absolutamente cruciales. Presentaré algunas propuestas nuevas, excitantes y, sin duda, tentativas, que establecen conexiones provocativas entre el entrelazamiento cuántico y la forma en que el espacio tiempo se dobla y curva, el fenómeno que usted y yo conocemos como "gravedad". Desde hace muchos años, la búsqueda de una completa y convincente teoría cuántica de la gravedad ha sido reconocida como una importante meta científica (prestigio, premios, robo de la facultad, y todo eso). Puede que el secreto no sea empezar con la gravedad y "cuantificarla", sino profundizar en la propia mecánica cuántica y encontrar que la gravedad estuvo al acecho todo el tiempo.

No lo sabemos con seguridad. Esa es la emoción y la ansiedad de la investigación de vanguardia. Pero ha llegado el momento de tomar en serio la naturaleza fundamental de la realidad, y eso significa enfrentarse a la mecánica cuántica de frente.

PART ONE

SPOOKY

1

¿Qué está pasando?

Mirando el mundo cuántico

Albert Einstein, que tenía un don con las palabras y con las ecuaciones, fue el que le puso a la mecánica cuántica la etiqueta que no ha podido sacudir desde entonces: *spukhaft*, normalmente traducido del alemán al inglés como "espeluznante". Al menos esa es la impresión que tenemos de la mayoría de las discusiones públicas de la mecánica cuántica. Se nos dice que es una parte de la física que es inevitablemente desconcertante, extraña, extraña, incognoscible, extraña, desconcertante. Espeluznante.

La inescrutabilidad puede ser seductora. Como un misterioso y sexy extraño, la mecánica cuántica nos tienta a proyectar todo tipo de cualidades y capacidades en ella, estén o no presentes. Una breve búsqueda de libros con "quantum" en el título revela la siguiente lista de supuestas aplicaciones:

Éxito cuántico
Liderazgo cuántico
La conciencia cuántica
El toque cuántico Yoga
Cuántico
Comida Cuántica
Psicología cuántica
Mente Cuántica
Gloria Cuántica
El perdón cuántico
Teología cuántica
Felicidad cuántica
Poesía cuántica
Enseñanza cuántica
Fe cuántica
Amor Cuántico

Para una rama de la física que a menudo se describe como relevante sólo para los procesos microscópicos que involucran partículas subatómicas, es un currículum bastante impresionante.

Para ser justos, la mecánica cuántica -o "física cuántica" o "teoría cuántica", las etiquetas son todas intercambiables- no sólo es relevante para los procesos microscópicos. Describe el mundo entero, desde usted y yo hasta las estrellas y galaxias, desde los centros de los agujeros negros hasta el comienzo del universo. Pero sólo cuando miramos el mundo de cerca, la aparente rareza de los fenómenos cuánticos se hace inevitable.

Uno de los temas de este libro es que la mecánica cuántica no merece la connotación de espeluznante, en el sentido de algún misterio inefable que está más allá de la comprensión de la mente humana. La mecánica cuántica es *asombrosa*; es novedosa, profunda, alargadora de la mente y una visión de la realidad muy diferente a la que estamos acostumbrados. La ciencia es así a veces. Pero si el tema parece difícil o desconcertante, la respuesta científica es resolver el rompecabezas, no pretender que no está ahí. Hay muchas razones para pensar que podemos hacer eso para la mecánica cuántica como cualquier otra teoría física.

Muchas presentaciones de la mecánica cuántica siguen un patrón típico. En primer lugar, apuntan a algún fenómeno cuántico contrario a la intuición. Luego, expresan la perplejidad de que el mundo pueda ser así, y la desesperación de que tenga sentido. Finalmente (si tienes suerte), intentan algún tipo de explicación.

Nuestro tema es valorar la claridad sobre el misterio, así que no quiero adoptar esa estrategia. Quiero presentar la mecánica cuántica de manera que sea lo más comprensible posible desde el principio. Seguirá pareciendo extraño, pero esa es la naturaleza de la bestia. Lo que no parecerá, esperemos, es inexplicable o ininteligible.

No haremos ningún esfuerzo por seguir el orden histórico. En este capítulo veremos los hechos experimentales básicos que nos obligan a la mecánica cuántica, y en el siguiente esbozaremos rápidamente el enfoque de Muchos Mundos para dar sentido a esas observaciones. Sólo en el capítulo

siguiente ofreceremos un relato semi-histórico de los descubrimientos que llevaron a la gente a contemplar un tipo de física tan dramáticamente nuevo en primer lugar. Entonces nos daremos cuenta de lo dramáticas que son algunas de las implicaciones de la mecánica cuántica.

Con todo esto en su lugar, sobre el resto del libro podemos emprender la divertida tarea de ver a dónde nos lleva todo esto, desmitificando los rasgos más sorprendentes de la realidad cuántica.

La física es una de las ciencias más básicas, de hecho, una de las tareas más básicas del ser humano. Miramos alrededor del mundo, vemos que está lleno de cosas. ¿Qué son esas cosas y cómo se comportan?

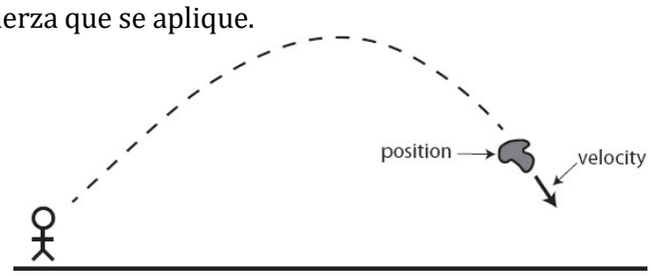
Estas son preguntas que se han hecho desde que la gente empezó a hacer preguntas. En la antigua Grecia, se pensaba que la física era el estudio general del cambio y el movimiento, tanto de la materia viva como de la no viva. Aristóteles hablaba un vocabulario de tendencias, propósitos y causas. La forma en que una entidad se mueve y cambia puede ser explicada por referencia a su naturaleza interna y a los poderes externos que actúan sobre ella. Los objetos típicos, por ejemplo, pueden por naturaleza estar en reposo; para que se muevan, es necesario que algo esté causando ese movimiento.

Todo esto cambió gracias a un tipo inteligente llamado Isaac Newton. En 1687 publicó *Principia Mathematica*, el trabajo más importante en la historia de la física. Fue allí donde sentó las bases de lo que ahora llamamos mecánica "clásica" o simplemente "newtoniana". Newton hizo desaparecer cualquier polvorienta charla sobre naturalezas y propósitos, revelando lo que había debajo: un nítido y riguroso formalismo matemático con el que los profesores continúan atormentando a los estudiantes hasta el día de hoy.

Cualquiera que sea el recuerdo que tengas de los deberes del instituto o de la universidad relacionados con los péndulos y los planos inclinados, las ideas básicas de la mecánica clásica son bastante simples. Considere un objeto como una roca. Ignore todo lo que un geólogo considere interesante de la roca, como su color y composición. Deje de lado la posibilidad de que la estructura básica de la roca pueda cambiar, por ejemplo, si la hace pedazos con un martillo. Reduzca su imagen mental de la roca a su forma más abstracta: la roca es un objeto, y ese objeto tiene una ubicación *en el espacio*, y esa ubicación *cambia con el tiempo*.

La mecánica clásica nos dice precisamente cómo la posición de la roca cambia con el tiempo. Ya estamos muy acostumbrados a eso, así que vale la pena reflexionar sobre lo impresionante que es esto. Newton no nos da algunos vagos tópicos sobre la tendencia general de las rocas a moverse más o menos de esta o aquella manera. Nos da reglas exactas e inquebrantables sobre cómo todo en el universo se mueve en respuesta a todo lo demás, reglas que pueden ser usadas para atrapar pelotas de béisbol o para aterrizar en Marte.

Así es como funciona. En cualquier momento, la roca tendrá una posición y también una velocidad, un ritmo al que se mueve. Según Newton, si no hay fuerzas que actúen sobre la roca, seguirá moviéndose en línea recta a velocidad constante, para siempre. (Esto ya es una gran desviación de Aristóteles, quien te habría dicho que los objetos necesitan ser empujados constantemente si van a mantenerse en movimiento). Si una fuerza actúa sobre la roca, -algún cambio en la velocidad de la roca, que podría hacerla ir más rápido, o más lento, o simplemente alterar su dirección- en proporción directa a la cantidad de fuerza que se aplique.



Eso es básicamente todo. Para averiguar toda la trayectoria de la roca, tienes que decirme su posición, su velocidad, y qué fuerzas están actuando sobre ella. Las ecuaciones de Newton te dicen el resto. Las fuerzas pueden incluir la fuerza de gravedad, o la fuerza de tu mano si coges la roca y la lanzas, o la fuerza del suelo cuando la roca llega a tierra. La idea funciona igual de bien para las bolas de billar o los cohetes o los planetas. El proyecto de la física, dentro de este paradigma clásico, consiste esencialmente en averiguar qué es lo que compone la materia del universo (rocas y demás) y qué fuerzas actúan sobre ellas.

La física clásica proporciona una imagen directa del mundo, pero se dieron varios pasos cruciales en el camino para establecerlo. Nótese que tuvimos que ser muy específicos sobre la información que requeríamos para averiguar lo que le sucedería a la roca: su posición, su velocidad y las fuerzas que actuaban sobre ella. Podemos pensar en esas fuerzas como parte del mundo exterior, y la información importante sobre la roca misma consiste sólo en su posición y velocidad. Por el contrario, la aceleración de la roca en cualquier momento en el tiempo no es algo que debamos especificar; eso es exactamente lo que las leyes de Newton nos permiten calcular a partir de la posición y la velocidad.

Juntas, la posición y la velocidad forman el *estado* de cualquier objeto en la mecánica clásica. Si tenemos un sistema con múltiples partes móviles, el estado clásico de todo ese sistema es sólo una lista de los estados de cada una de las partes individuales. El aire en una habitación de tamaño normal tendrá quizás 10^{27} moléculas de diferentes tipos, y el estado de ese aire sería una lista de la posición y la velocidad de cada una de ellas. (Estrictamente hablando, a los físicos les gusta usar el momento de cada partícula, en lugar de su velocidad, pero en lo que respecta a la mecánica newtoniana el momento es simplemente la masa de la partícula por su velocidad). El conjunto de todos los estados posibles que un sistema podría tener se conoce como el *espacio de fase* del sistema.

El matemático francés Pierre-Simon Laplace señaló una profunda implicación del pensamiento de la mecánica clásica. En principio, un vasto intelecto podía conocer el estado de literalmente cada objeto del universo, de lo cual podía deducir todo lo que sucedería en el futuro, así como todo lo que había sucedido en el pasado. *El demonio de Laplace* es un experimento de pensamiento, no un proyecto realista para un ambicioso informático, pero las implicaciones del experimento de pensamiento son profundas. La mecánica newtoniana describe un universo determinista, con un mecanismo de relojería.

La maquinaria de la física clásica es tan hermosa y convincente que parece casi ineludible una vez que la captas. Muchas grandes mentes que vinieron después de Newton estaban convencidas de que la superestructura básica de la física había sido resuelta, y el progreso futuro residía en averiguar exactamente qué realización de la física clásica (qué partículas, qué fuerzas) era la correcta para describir el universo como un todo. Incluso la relatividad, que estaba transformando el mundo a su manera, es una variedad de la mecánica clásica más que un sustituto de ella.

Luego llegó la mecánica cuántica y todo cambió.

Junto con la formulación de Newton de la mecánica clásica, la invención de la mecánica cuántica representa la otra gran revolución en la historia de la física. A diferencia de todo lo anterior, la teoría cuántica no propuso un modelo físico particular dentro del marco básico clásico; descartó por completo ese marco, reemplazándolo con algo profundamente diferente.

El nuevo elemento fundamental de la mecánica cuántica, lo que la hace inequívocamente distinta de su predecesora clásica, se centra en la cuestión de lo que significa *medir* algo sobre un sistema cuántico. Qué es exactamente una medición, y qué sucede cuando medimos algo, y qué nos dice todo esto sobre lo que realmente está sucediendo entre bastidores: juntas, estas preguntas constituyen lo que se llama el *problema de la medición de* la mecánica cuántica. No hay absolutamente ningún consenso dentro de la física o la filosofía sobre cómo resolver el problema de la medición, aunque hay un número de ideas prometedoras.

Los intentos de abordar el problema de la medición han dado lugar a la aparición de un campo conocido como *la interpretación de la mecánica cuántica*, aunque la etiqueta no es muy precisa. Las "interpretaciones" son cosas que podríamos aplicar a una obra de literatura o arte, donde la gente podría tener diferentes maneras de pensar sobre el mismo objeto básico. Lo que ocurre en la mecánica cuántica es otra cosa: una competencia entre teorías científicas realmente distintas, formas incompatibles de dar sentido al mundo físico. Por esta razón, los trabajadores modernos en este campo prefieren llamarlo "fundamentos de la mecánica cuántica". El tema de los fundamentos cuánticos es parte de la ciencia, no de la crítica literaria.

Nadie ha sentido nunca la necesidad de hablar de "interpretaciones de la mecánica clásica" - la mecánica clásica es perfectamente transparente. Hay un formalismo matemático que habla de posiciones y velocidades y trayectorias, y oh, mira: hay una roca cuyo movimiento real en el mundo obedece a las predicciones de ese formalismo. No existe, en particular, un problema de medición en la mecánica clásica. El estado del sistema viene dado por su posición y su velocidad, y si queremos medir esas cantidades, simplemente lo hacemos. Por supuesto, podemos medir el sistema de forma descuidada o cruda, obteniendo así resultados imprecisos o alterando el propio sistema. Pero no tenemos que hacerlo; sólo siendo cuidadosos, podemos medir con precisión todo lo que hay que saber

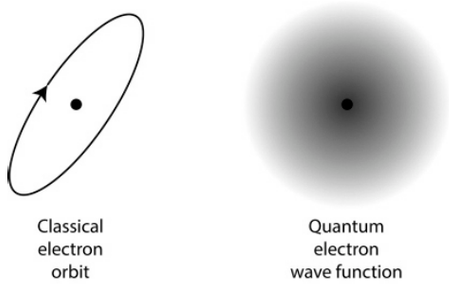
sobre el sistema sin alterarlo de ninguna manera perceptible. La mecánica clásica ofrece una relación clara e inequívoca entre lo que vemos y lo que la teoría describe.

La mecánica cuántica, a pesar de todos sus éxitos, no ofrece tal cosa. El enigma en el corazón de la realidad cuántica puede resumirse en un simple lema: lo que *vemos* cuando miramos el mundo parece ser fundamentalmente diferente de lo que realmente *es*.

Piense en los electrones, las partículas elementales que orbitan alrededor de los núcleos atómicos, cuyas interacciones son responsables de toda la química y, por lo tanto, de casi todo lo interesante que le rodea en este momento. Como hicimos con la roca, podemos ignorar algunas de las propiedades específicas del electrón, como su espín y el hecho de que tiene un campo eléctrico. (En realidad podríamos quedarnos con la roca como nuestro ejemplo - las rocas son sistemas cuánticos tanto como los electrones - pero cambiar a una partícula subatómica nos ayuda a recordar que las características que distinguen a la mecánica cuántica sólo se hacen evidentes cuando consideramos objetos muy pequeños de hecho).

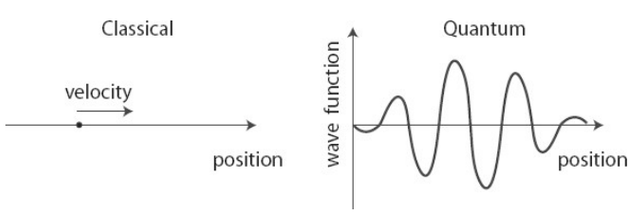
A diferencia de la mecánica clásica, donde el estado de un sistema se describe por su posición y velocidad, la naturaleza de un sistema cuántico es algo un poco menos concreto. Consideremos un electrón en su hábitat natural, orbitando el núcleo de un átomo. Se podría pensar, a partir de la palabra "órbita", así como de las numerosas representaciones en dibujos animados de átomos a las que sin duda ha estado expuesto a lo largo de los años, que la órbita de un electrón es más o menos como la órbita de un planeta del sistema solar. El electrón (así se podría pensar) tiene una ubicación, y una velocidad, y a medida que pasa el tiempo se mueve alrededor del núcleo central en un círculo o tal vez una elipse.

La mecánica cuántica sugiere algo diferente. Podemos *medir* los valores del lugar o la velocidad (aunque no al mismo tiempo), y si somos experimentadores suficientemente cuidadosos y talentosos obtendremos alguna respuesta. Pero lo que estamos viendo a través de tal medición no es el estado real, completo y sin barniz del electrón. De hecho, el resultado particular de la medición que obtendremos no puede predecirse con perfecta confianza, en una profunda desviación de las ideas de la mecánica clásica. Lo mejor que podemos hacer es predecir la *probabilidad* de ver el electrón en un lugar determinado o con una velocidad determinada.



La noción clásica del estado de una partícula, "su ubicación y su velocidad", es por lo tanto reemplazada en la mecánica cuántica por algo totalmente ajeno a nuestra experiencia cotidiana: una nube de probabilidad. Para un electrón en un átomo, esta nube es más densa hacia el centro y se adelgaza a medida que nos alejamos. Donde la nube es más densa, la probabilidad de ver el electrón es mayor; donde se diluye casi hasta la imperceptibilidad, la probabilidad de ver el electrón es cada vez menor.

Esta nube se suele denominar *función de onda*, porque puede oscilar como una onda, ya que el resultado de la medición más probable cambia con el tiempo. Normalmente denominamos una función de onda por Ψ, la letra griega Psi. Para cada resultado de medición posible, como la posición de la partícula, la función de onda asigna un número específico, llamado la *amplitud* asociada a ese resultado. La amplitud que una partícula está en alguna posición *x0*, por ejemplo, se escribiría Ψ(*x0*).



La probabilidad de obtener ese resultado cuando realizamos una medición viene dada por la amplitud al cuadrado.

Probabilidad de un resultado en particular = |Aplitud para ese resultado|2

Esta simple relación se llama la *regla de* Born, en honor al físico Max Born. * Parte de nuestra tarea será averiguar de qué parte del mundo vino tal regla.

Definitivamente *no* estamos diciendo que haya un electrón con alguna posición y velocidad, y simplemente no sabemos cuáles son, así que la función de onda encapsula nuestra ignorancia sobre esas cantidades. En este capítulo no estamos diciendo nada en absoluto sobre lo que "es", sólo lo que observamos. En los próximos capítulos, golpearé la mesa e insistiré en que la función de onda es la suma total de la realidad, e ideas como la posición o la velocidad del electrón son simplemente cosas que podemos medir. Pero no todo el mundo ve las cosas de esa manera, y por el momento estamos eligiendo ponernos una máscara de imparcialidad.

Coloquemos las reglas de la mecánica clásica y cuántica una al lado de la otra para compararlas. El estado de un sistema clásico viene dado por la posición y la velocidad de cada una de sus partes móviles. Para seguir su evolución, imaginamos algo como el siguiente procedimiento:

Reglas de la mecánica clásica

1. Configure el sistema fijando una posición y una velocidad específicas para cada parte.
2. Evolucionar el sistema usando las leyes de movimiento de Newton.

Eso es todo. El diablo está en los detalles, por supuesto. Algunos sistemas clásicos pueden tener muchas piezas móviles.

En contraste, las reglas de la mecánica cuántica estándar de los libros de texto vienen en dos partes. En la primera parte, tenemos una estructura que es exactamente paralela a la del caso clásico. Los sistemas cuánticos se describen por funciones de onda en lugar de por posiciones y velocidades. Así como las leyes del movimiento de Newton gobiernan la evolución del estado de un sistema en la mecánica clásica, hay una ecuación que gobierna la evolución de las funciones de onda, llamada ecuación *de Schrödinger*. Podemos expresar la ecuación de Schrödinger en palabras como: "La tasa de cambio de una función de onda es proporcional a la energía del sistema cuántico". Ligeramente más específicamente, una función de onda puede representar un número de diferentes energías posibles, y la ecuación de Schrödinger dice que las partes de alta energía de la función de onda evolucionan rápidamente, mientras que las partes de baja energía evolucionan muy lentamente. Lo que tiene sentido, cuando pensamos en ello.

Lo que importa para nuestros propósitos es simplemente que existe tal ecuación, una que predice cómo las funciones de las ondas evolucionan suavemente a través del tiempo. Esa evolución es tan predecible e inevitable como la forma en que los objetos se mueven según las leyes de Newton en la mecánica clásica. No está sucediendo nada raro todavía.

El comienzo de la receta cuántica dice algo así:

Reglas de la mecánica cuántica (Primera parte)

1. Configure el sistema fijando una función de onda específica Ψ.
2. Evolucionar el sistema usando la ecuación de Schrödinger.

Hasta ahora, todo bien, estas partes de la mecánica cuántica son exactamente paralelas a sus predecesoras clásicas. Pero mientras que las reglas de la mecánica clásica se detienen allí, las reglas de la mecánica cuántica siguen adelante.

Todas las reglas extra tratan de la medición. Cuando realizas una medición, como la posición o el giro de una partícula, la mecánica cuántica dice que sólo hay ciertos resultados posibles que obtendrás. No puedes predecir cuál de los resultados será, pero puedes calcular la probabilidad de cada resultado permitido. Y después de que se hace la medición, la función de onda *colapsa* a una función

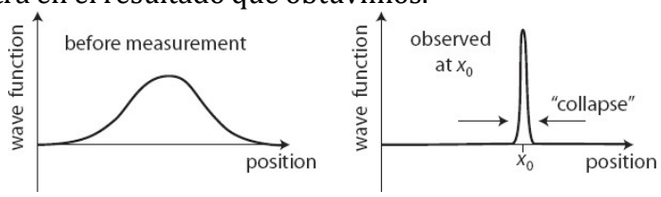
completamente diferente, con toda la nueva probabilidad concentrada en el resultado que acabas de obtener. Por lo tanto, si se mide un sistema cuántico, en general lo mejor que se puede hacer es predecir las probabilidades de varios resultados, pero si se midiera inmediatamente la misma cantidad de nuevo, siempre se obtendría la misma respuesta: la función de onda se ha colapsado en ese resultado.

Escribamos esto con todo detalle.

Reglas de la Mecánica Cuántica (Segunda Parte)

3. Hay ciertas cantidades observables que podemos elegir para medir, como la posición, y cuando las medimos, obtenemos resultados definitivos.

4. La probabilidad de obtener un resultado en particular puede calcularse a partir de la función de onda. La función de onda asocia una amplitud con cada resultado de medición posible; la probabilidad de cualquier resultado es el cuadrado de esa amplitud.
5. Al medirla, la función de la onda se colapsa. Por muy extendida que haya sido la medición previa, después se concentra en el resultado que obtuvimos.



En un plan de estudios universitario moderno, cuando los estudiantes de física son expuestos por primera vez a la mecánica cuántica, se les enseña alguna versión de estas cinco reglas. La ideología asociada a esta presentación - las medidas de tratamiento como fundamentales, las funciones de onda se colapsan cuando se observan, no hacen preguntas sobre lo que está pasando entre bastidores - a veces se llama la interpretación de *Copenhague de la mecánica cuántica*. Pero la gente, incluyendo los físicos de Copenhague que supuestamente inventaron esta interpretación, no están de acuerdo en lo que precisamente esa etiqueta debe ser tomada para describir. Podemos referirnos a ella como "mecánica cuántica estándar de libro de texto".

La idea de que estas reglas representen cómo funciona la realidad es, no hace falta decirlo, escandalosa.

¿Qué quiere decir exactamente con "medición"? ¿Qué tan rápido sucede? ¿Qué es exactamente lo que constituye un aparato de medición? ¿Necesita ser humano, o tener algún grado de conciencia, o tal vez la capacidad de codificar información? O tal vez sólo tiene que ser macroscópico, y si es así, ¿qué tan macroscópico tiene que ser? ¿Cuándo exactamente se produce la medición, y con qué rapidez? ¿Cómo es posible que la función de la onda colapse tan dramáticamente? Si la función de onda estuviera muy extendida, ¿el colapso ocurre más rápido que la velocidad de la luz? ¿Y qué sucede con todas las posibilidades que aparentemente fueron permitidas por la función de onda pero que no observamos? ¿Nunca estuvieron realmente allí? ¿Se desvanecen en la nada?

Para poner las cosas en claro: ¿Por qué los sistemas cuánticos evolucionan de forma suave y determinante según la ecuación de Schrödinger mientras *no los miramos*, pero se colapsan dramáticamente cuando los miramos? ¿Cómo lo saben y por qué les importa? (No te preocupes, vamos a responder a todas estas preguntas.)

La ciencia, según la mayoría de la gente, busca entender el mundo natural. Observamos las cosas que suceden, y la ciencia espera proporcionar una explicación de lo que está pasando.

En su actual formulación de libro de texto, la mecánica cuántica ha fallado en esta ambición. No sabemos lo que realmente está pasando, o al menos la comunidad de físicos profesionales no puede ponerse de acuerdo en lo que es. Lo que tenemos en cambio es una *receta* que consagramos en los libros de texto y enseñamos a nuestros estudiantes. Isaac Newton podría decirles, a partir de la posición y la velocidad de una roca que ha lanzado al aire en el campo gravitatorio de la Tierra, cuál iba a ser la trayectoria posterior de esa roca. Análogamente, comenzando con un sistema cuántico

preparado de alguna manera particular, las reglas de la mecánica cuántica pueden decirte cómo la función de onda cambiará con el tiempo, y cuál será la probabilidad de varios posibles resultados de medición si eliges observarlo.

El hecho de que la receta cuántica nos proporcione probabilidades en lugar de certezas puede ser molesto, pero podríamos aprender a vivir con ello. Lo que nos molesta, o debería, es nuestra falta de comprensión de lo que realmente está sucediendo.

Imaginen que algún genio retorcido averiguó todas las leyes de la física, pero en lugar de revelarlas al resto del mundo, programaron un ordenador para responder a preguntas sobre problemas específicos de la física, y pusieron una interfaz al programa en una página web. Cualquiera que estuviera interesado podía simplemente navegar por esa página, teclear una pregunta de física bien planteada, y obtener la respuesta correcta.

Tal programa sería obviamente de gran utilidad para los científicos e ingenieros. Pero tener acceso al sitio no calificaría como la comprensión de las leyes de la física. Tendríamos un oráculo que se dedicaría a dar respuestas a preguntas específicas, pero nosotros mismos careceríamos por completo de cualquier idea intuitiva de las reglas subyacentes del juego. El resto de los científicos del mundo, a quienes se les presentara tal oráculo, no se sentirían movidos a declarar la victoria; continuarían con su trabajo de averiguar cuáles eran realmente las leyes de la naturaleza.

La mecánica cuántica, en la forma en que se presenta actualmente en los libros de texto de física, representa un oráculo, no una verdadera comprensión. Podemos establecer problemas específicos y responderlos, pero no podemos explicar honestamente lo que está sucediendo entre bastidores. Lo que sí tenemos son varias buenas ideas sobre lo que podría ser, y ya es hora de que la comunidad de la física empiece a tomar estas ideas en serio.

---

* Hay un pequeño tecnicismo, que mencionaremos aquí y luego olvidaremos: la amplitud para cualquier resultado dado es en realidad un número complejo, no un número real. Los números reales son los que aparecen en la línea numérica, cualquier número entre menos infinito y más infinito. Cada vez que se toma el cuadrado de un número real, se obtiene otro número real que es mayor o igual a cero, por lo que en lo que respecta a los números reales no existe la raíz cuadrada de un número negativo. Los matemáticos se dieron cuenta hace mucho tiempo de que las raíces cuadradas de los números negativos serían cosas realmente útiles de tener, así que definieron la "unidad imaginaria" *i* como la raíz cuadrada de -1. Un número imaginario es sólo un número real, llamado "la parte imaginaria", multiplicado por *i*. Entonces un número complejo es sólo una combinación de un número real y uno imaginario. Las pequeñas barras en la notación |Amplitude|2 en la regla de Born significan que en realidad sumamos los cuadrados de las partes real e imaginaria. Todo eso es sólo para los que se pegan, de ahora en adelante estaremos felices de decir "la probabilidad es la amplitud al cuadrado" y terminar con ello.

2

La valiente formulación

Mecánica cuántica austera

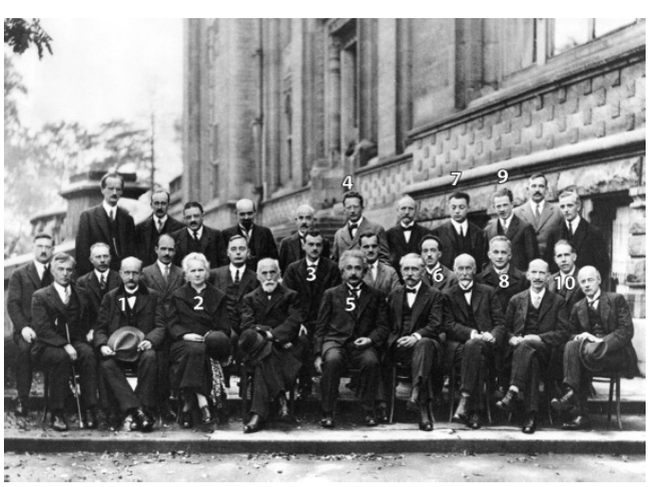
La actitud inculcada a los jóvenes estudiantes por los modernos libros de texto de mecánica cuántica ha sido resumida de forma compacta por el físico N. David Mermin como "¡Cállate y calcula!" El mismo Mermin no estaba defendiendo tal posición, pero otros lo han hecho. Todo físico decente pasa mucho tiempo calculando cosas, sea cual sea su actitud hacia los fundamentos cuánticos. Así que en realidad la amonestación podría acortarse a un simple "¡Cállate!" *

No siempre fue así. La mecánica cuántica tardó décadas en unirse, pero se redondeó a su forma moderna alrededor de 1927. En ese año, en la Quinta Conferencia Internacional de Solvay en Bélgica, los principales físicos del mundo se reunieron para discutir el estado y el significado de la teoría cuántica. Para entonces las pruebas experimentales eran claras, y los físicos estaban por fin en posesión de una formulación cuantitativa de las reglas de la mecánica cuántica. Era el momento de arremangarse y averiguar a qué equivalía esta nueva y loca visión del mundo.

Las discusiones en esta conferencia ayudan a preparar el escenario, pero nuestro objetivo aquí no es hacer la historia bien. Queremos entender la física. Así que vamos a esbozar un camino lógico por el que nos llevará a una teoría científica completa de la mecánica cuántica. Sin un vago misticismo, sin reglas aparentemente ad hoc. Sólo un simple conjunto de suposiciones que llevan a algunas conclusiones notables. Con esta imagen en mente, muchas cosas que de otra manera podrían haber parecido ominosamente misteriosas comenzarán de repente a tener perfecto sentido.

La Conferencia de Solvay ha pasado a la historia como el comienzo de una famosa serie de debates entre Albert Einstein y Niels Bohr sobre cómo pensar en la mecánica cuántica. Bohr, un físico danés con sede en Copenhague, considerado con razón como el padrino de la teoría cuántica, abogó por un enfoque similar a la receta de libro de texto que discutimos en el último capítulo: utilizar la mecánica cuántica para calcular las probabilidades de los resultados de las mediciones, pero no pedirle nada más que eso. En particular, no se preocupe demasiado por lo que realmente está sucediendo entre bastidores. Apoyado por sus colegas más jóvenes Werner Heisenberg y Wolfgang Pauli, Bohr insistió en que la mecánica cuántica era una teoría perfectamente buena tal como era.

Einstein no tendría nada de eso. Estaba firmemente convencido de que el deber de la física era precisamente preguntar qué estaba pasando entre bastidores, y que el estado de la mecánica cuántica en 1927 estaba muy lejos de proporcionar un relato satisfactorio de la naturaleza. Con sus propios simpatizantes, como Erwin Schrödinger y Louis de Broglie, Einstein abogó por mirar más profundamente e intentar extender y generalizar la mecánica cuántica en una teoría física satisfactoria.



Participantes en la Conferencia de Solvay de 1927. Entre los más conocidos estaban: 1. Max Planck, 2. Marie Curie, 3. Paul Dirac, 4. Erwin Schrödinger, 5. Albert Einstein, 6. Louis de Broglie, 7. Wolfgang Pauli, 8. Max Born, 9. Werner Heisenberg, y 10. Niels Bohr. (Cortesía de Wikipedia)

Einstein y sus compatriotas tenían razones para ser cautelosamente optimistas en cuanto a que una teoría tan nueva y mejorada estaba ahí fuera para ser encontrada. Apenas unas décadas antes, en los últimos años del siglo XIX, los físicos habían desarrollado la teoría de la mecánica estadística, que describía el movimiento de un gran número de átomos y moléculas. Un paso clave en ese desarrollo, que tuvo lugar bajo la rúbrica de la mecánica clásica, antes de que la teoría cuántica entrara en escena, fue la idea de que podemos hablar con provecho del comportamiento de una gran colección de partículas, incluso si no conocemos con precisión la posición y la velocidad de cada una de ellas. Todo lo que necesitamos saber es una *distribución de probabilidad que describa* la probabilidad de que las partículas se comporten de varias maneras.

En la mecánica estadística, en otras palabras, pensamos que en realidad hay algún estado clásico particular de todas las partículas, pero no lo sabemos, todo lo que tenemos es una distribución de probabilidades. Felizmente, tal distribución es todo lo que necesitamos para hacer una gran cantidad de física útil, ya que fija propiedades como la temperatura y la presión del sistema. Pero la distribución no es una descripción completa del sistema; es simplemente un reflejo de lo que sabemos (o no) sobre él. Para etiquetar esta distinción con palabras filosóficas de moda, en la mecánica estadística la distribución de probabilidad es una noción epistémica -describiendo el estado de nuestro conocimiento- en lugar de una *ontológica -describiendo* alguna característica objetiva de la realidad. La epistemología es el estudio del conocimiento; la ontología es el estudio de lo que es real.

Era natural, en 1927, sospechar que la mecánica cuántica debía ser pensada de manera similar. Después de todo, para entonces ya habíamos descubierto que para lo que utilizamos las funciones de onda es para calcular la probabilidad de cualquier resultado de medición en particular. Seguramente hace

Seguramente tiene sentido imaginar que la propia naturaleza sabe con precisión cuál va a ser el resultado, pero el formalismo de la teoría cuántica simplemente no capta completamente ese conocimiento, y por lo tanto debe ser mejorado. La función de onda, desde este punto de vista, no es la historia completa; hay "variables ocultas" adicionales que fijan cuáles van a ser los resultados reales de la medición, incluso si no sabemos (y tal vez nunca podamos determinar antes de la medición) cuáles son sus valores.

Tal vez. Pero en los años siguientes se han obtenido varios resultados, en particular por el físico John Bell en la década de 1960, lo que implica que los intentos más simples y directos en este sentido están condenados al fracaso. La gente que lo intentó, de hecho, de Broglie, presentó una teoría específica, que fue redescubierta y ampliada por David Bohm en la década de 1950, y Einstein y Schrödinger, ambos dieron la vuelta a las ideas. Pero el teorema de Bell implica que cualquier teoría de este tipo requiere "acción a distancia" - una medición en un lugar puede afectar instantáneamente el estado del universo arbitrariamente lejos. Esto parece ser una violación del espíritu, si no de la letra, de la teoría de la relatividad, que dice que los objetos e influencias no pueden propagarse más rápido que la velocidad de la luz. El enfoque de la variable oculta sigue siendo perseguido activamente, pero todos los intentos conocidos en este sentido son desgarbados y difíciles de reconciliar con las teorías modernas como el Modelo Estándar de la física de partículas, sin mencionar las ideas especulativas sobre la gravedad cuántica, como veremos más adelante. Tal vez por eso Einstein, el pionero de la relatividad, nunca encontró una teoría satisfactoria propia.

En la imaginación popular, Einstein perdió los debates de Bohr-Einstein. Se nos dice que Einstein, un revolucionario creativo en su juventud, había envejecido y era conservador, y era incapaz de aceptar o incluso comprender las dramáticas implicaciones de la nueva teoría cuántica. (En la época de la Conferencia de Solvay Einstein tenía cuarenta y ocho años.) La física siguió posteriormente sin él, ya que el gran hombre se retiró para perseguir los intentos idiosincrásicos de encontrar una teoría de campo unificada.

Nada más lejos de la realidad. Mientras que Einstein fracasó en presentar una completa y convincente generalización de la mecánica cuántica, su insistencia en que la física necesita hacerlo mejor que callarse y calcular estaba directamente en el punto. Está muy fuera de lugar pensar que no entendió la teoría cuántica. Einstein la entendió tan bien como cualquiera, y continuó haciendo contribuciones fundamentales al tema, incluyendo la demostración de la importancia del entrelazamiento cuántico, que juega un papel central en nuestra mejor imagen actual de cómo funciona realmente el universo. Lo que no logró fue convencer a sus colegas físicos de la inadecuación del enfoque de Copenhague y de la importancia de esforzarse más por comprender los fundamentos de la teoría cuántica.

Si queremos seguir la ambición de Einstein de una teoría completa, inequívoca y realista del mundo natural, pero nos desaniman las dificultades de introducir nuevas variables ocultas en la mecánica cuántica, ¿nos queda alguna estrategia?

Un enfoque es olvidarse de las nuevas variables, tirar todas las ideas problemáticas sobre el proceso de medición, despojar a la mecánica cuántica de su esencia absoluta y preguntarse qué sucede. ¿Cuál es la versión más pobre y mezquina de la teoría cuántica que podemos inventar, y aún así esperamos explicar los resultados experimentales?

Cada versión de la mecánica cuántica (y hay muchas) emplea una función de onda o algo equivalente, y postula que la función de onda obedece a la ecuación de Schrödinger, al menos la mayor parte del tiempo. Estos van a tener que ser ingredientes en casi cualquier teoría que podamos tomar en serio. Veamos si podemos ser obstinadamente minimalistas, y salirnos con la suya añadiendo poco o nada más al formalismo.

Este enfoque minimalista tiene dos aspectos. Primero, nos tomamos en serio la función de onda como una representación directa de la realidad, no sólo como un dispositivo de contabilidad para ayudarnos a organizar nuestro conocimiento. La tratamos como ontológica, no epistémica. Esa es la estrategia más austera que podemos imaginarnos adoptar, ya que cualquier otra cosa supondría una estructura adicional por encima de la función de onda. Pero también es un paso dramático, ya que las funciones de onda son muy diferentes de lo que observamos cuando miramos el mundo. No *vemos* las funciones de onda; vemos los resultados de las mediciones, como la posición de una partícula. Pero la

teoría parece exigir que las funciones de onda jueguen un papel central, así que veamos hasta dónde podemos llegar imaginando que la realidad está exactamente descrita por una función de onda cuántica.

En segundo lugar, si la función de onda suele evolucionar sin problemas de acuerdo con la ecuación de Schrödinger, supongamos que es lo que siempre hace. En otras palabras, borremos por completo todas esas reglas adicionales sobre la medición en la receta cuántica, y volvamos a la descarnada simplicidad del paradigma clásico: hay una función de onda, y evoluciona de acuerdo con una regla determinista, y eso es todo lo que hay que decir. Podríamos llamar a esta propuesta "mecánica cuántica austera", o AQM para abreviar. Está en contraste con la mecánica cuántica de libro de texto, donde apelamos a funciones de onda que se colapsan y tratamos de evitar hablar de la naturaleza fundamental de la realidad por completo.

Una estrategia audaz. Pero hay un problema inmediato: *parece* que las funciones de las ondas se colapsan. Cuando hacemos mediciones de un sistema cuántico con una función de onda extendida, obtenemos una respuesta específica. Incluso si pensamos que una función de onda de electrones es una nube difusa centrada en el núcleo, cuando realmente la miramos no vemos tal nube, vemos una partícula puntual en algún lugar en particular. Y si miramos inmediatamente de nuevo, vemos el electrón básicamente en el mismo lugar. Hay una buena razón por la que los pioneros de la mecánica cuántica inventaron la idea del colapso de las funciones de onda, porque eso es lo que parecen hacer.

Pero tal vez sea demasiado rápido. Demos vuelta a la pregunta. En lugar de empezar con lo que vemos y tratar de inventar una teoría para explicarlo, empecemos con la mecánica cuántica austera (las funciones de onda evolucionan suavemente, eso es todo), y preguntemos qué experimentaría realmente la gente en un mundo descrito por esa teoría.

Piensa en lo que esto podría significar. En el último capítulo, tuvimos cuidado de hablar de la función de onda como una especie de caja negra matemática de la que se podían extraer predicciones para los resultados de las mediciones: para cualquier resultado concreto, la función de onda asigna una amplitud, y la probabilidad de obtener ese resultado es la amplitud al cuadrado. Max Born, quien propuso la regla de Born, fue uno de los asistentes a Solvay en 1927.

Ahora estamos diciendo algo más profundo y directo. La función de onda no es un dispositivo de contabilidad, es una representación exacta del sistema cuántico, al igual que un conjunto de posiciones y velocidades sería una representación de un sistema clásico. El mundo *es* una función de onda, ni más ni menos. Podemos usar la frase "estado cuántico" como sinónimo de "función de onda", en paralelo directo con llamar a un conjunto de posiciones y velocidades un "estado clásico".

Esta es una afirmación dramática sobre la naturaleza de la realidad. En una conversación ordinaria, incluso entre veteranos canosos de la física cuántica, la gente siempre habla de conceptos como "la posición del electrón". Pero este punto de vista de "la función de la onda es todo" implica que tal conversación es errónea de una manera importante. No existe tal cosa como "la posición del electrón". Sólo existe la función de onda del electrón. La mecánica cuántica implica una profunda distinción entre "lo que podemos observar" y "lo que realmente hay". Nuestras observaciones no están revelando hechos preexistentes de los que antes éramos ignorantes; en el mejor de los casos, revelan una diminuta porción de una realidad mucho más grande y fundamentalmente esquiva.

Considere una idea que escuchará a menudo: "Los átomos son en su mayoría espacio vacío". Totalmente equivocada, según la forma de pensar de la AQM. Viene de una obstinada insistencia en pensar que un electrón es un pequeño punto clásico que se mueve dentro de la función de onda, en lugar de que el electrón *sea realmente* la función de onda. En AQM, no hay nada que se mueva alrededor; sólo existe el estado cuántico. Los átomos no son en su mayoría espacio vacío; se describen por las funciones de onda que se extienden a lo largo de la extensión del átomo.

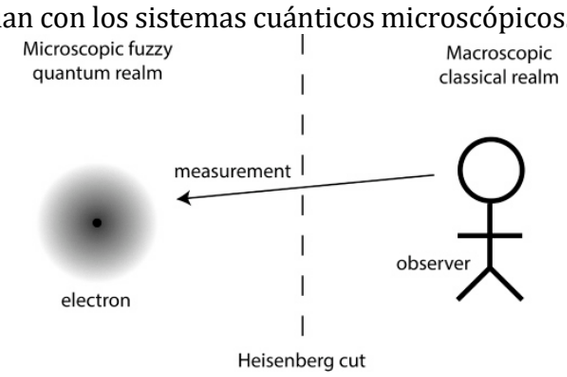
La forma de salir de nuestra intuición clásica es abandonar la idea de que el electrón tiene una ubicación particular. Un electrón está en una *superposición* de todas las posiciones posibles en las que podríamos verlo, y no encaja en ninguna ubicación específica hasta que realmente observamos que está allí. "Superposición" es la palabra que los físicos usan para enfatizar que el electrón existe en una combinación de todas las posiciones, con una amplitud particular para cada una. La realidad cuántica es una función de onda; las posiciones y velocidades clásicas son simplemente lo que podemos observar cuando sondeamos esa función de onda.

Así que la realidad de un sistema cuántico, de acuerdo con la austera mecánica cuántica, se describe por una función de onda o estado cuántico, que puede pensarse como una superposición de todos los

posibles resultados de alguna observación que queramos hacer. ¿Cómo pasamos de ahí a la molesta realidad de que las funciones de onda parecen colapsar cuando hacemos tales mediciones?

Comienza examinando la afirmación "medimos la posición del electrón" con un poco más de cuidado. ¿Qué implica realmente este proceso de medición? Presumiblemente algo de equipo de laboratorio y un poco de destreza experimental, pero no tenemos que preocuparnos por los detalles. Todo lo que necesitamos saber es que hay algún aparato de medición (una cámara o lo que sea) que de alguna manera interactúa con el electrón, y luego nos permite leer dónde se vio el electrón.

En la receta cuántica de los libros de texto, esa es la mayor perspicacia que podríamos obtener. Algunas de las personas que fueron pioneras en este enfoque, incluyendo a Niels Bohr y Werner Heisenberg, irían un poco más allá, haciendo explícita la idea de que el aparato de medición debe ser pensado como un objeto clásico, incluso si el electrón que estaba observando era de mecánica cuántica. Esta línea de división entre las partes del mundo que deben ser tratadas usando descripciones cuánticas versus clásicas es a veces llamada el *corte de Heisenberg.* En lugar de aceptar que la mecánica cuántica es fundamental y que la mecánica clásica es sólo una buena aproximación a ella en circunstancias apropiadas, la mecánica cuántica de libro de texto pone el mundo clásico en el centro de atención, como la forma correcta de hablar de la gente y las cámaras y otras cosas macroscópicas que interactúan con los sistemas cuánticos microscópicos.



Esto no huele bien. La primera suposición debería ser que la división cuántica/clásica es una cuestión de nuestra conveniencia personal, no un aspecto fundamental de la naturaleza. Si los átomos obedecen las reglas de la mecánica cuántica y las cámaras están hechas de átomos, presumiblemente las cámaras también obedecen las reglas de la mecánica cuántica. En realidad, usted y yo presumiblemente obedecemos las reglas de la mecánica cuántica. El hecho de que seamos objetos grandes, madereros y macroscópicos podría hacer de la física clásica una buena aproximación a lo que somos, pero nuestra primera suposición debería ser que es realmente cuántica de arriba a abajo.

Si eso es cierto, no es sólo el electrón el que tiene una función de onda. La cámara debería tener una función de onda propia. También el experimentador. Todo es cuántico.

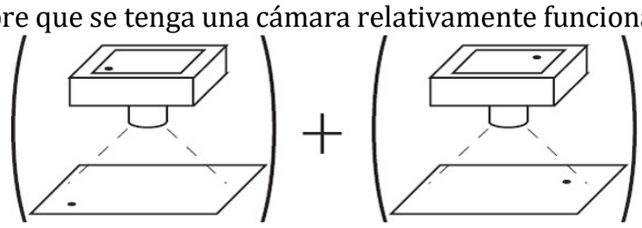
Ese simple cambio de perspectiva sugiere un nuevo ángulo en el problema de la medición. La actitud de la AQM es que no debemos tratar el proceso de medición como algo místico o incluso necesitado de su propio conjunto de reglas; la cámara y el electrón simplemente interactúan entre sí de acuerdo con las leyes de la física, como lo hacen una roca y la tierra.

Un estado cuántico describe los sistemas como superposiciones de diferentes resultados de medición. El electrón, en general, comenzará en una superposición de varios lugares, todos los lugares que podríamos ver si miramos. La cámara comienza en alguna función de onda que puede parecer complicada, pero equivale a decir "Esta es una cámara, y aún no ha mirado al electrón". Pero entonces sí mira al electrón, que es una interacción física gobernada por la ecuación de Schrödinger. Y después de esa interacción, podríamos esperar que la propia cámara esté ahora en una superposición de todos los posibles resultados de medición que podría haber observado: la cámara vio el electrón en *este* lugar, o la cámara vio el electrón en *ese* lugar, y así sucesivamente.

Si esa fuera toda la historia, AQM sería un desastre insostenible. Electrones en superposiciones, cámaras en superposiciones, nada que se parezca mucho al robusto mundo aproximadamente clásico de nuestra experiencia.

Afortunadamente podemos apelar a otra característica sorprendente de la mecánica cuántica: dados dos objetos diferentes (como un electrón y una cámara), no están descritos por funciones de onda individuales y separadas. *Sólo hay una función de onda*, que describe todo el sistema que nos interesa, hasta la "función de onda del universo" si hablamos de todo el shebang. En el caso que nos ocupa, hay una función de onda que describe el sistema combinado electrón+cámara. Así que lo que realmente tenemos es una superposición de todas las combinaciones posibles de dónde podría haber estado el electrón, y dónde la cámara realmente observó que estaba.

Aunque tal superposición en principio incluye todas las posibilidades, a la mayoría de los posibles resultados se les asigna un peso cero en el estado cuántico. La nube de probabilidad se desvanece en la nada para la mayoría de las combinaciones posibles de localización de electrones e imagen de cámara. En particular, no hay probabilidad de que el electrón estuviera en un lugar pero la cámara lo viera en otro lugar (siempre que se tenga una cámara relativamente funcional).



Este es el fenómeno cuántico conocido como *enredo*. Hay una función de onda única para el sistema combinado electrón+cámara, que consiste en una superposición de varias posibilidades de la forma "el electrón estaba en este lugar, y la cámara lo observó en el mismo lugar". En lugar de que el electrón y la cámara hagan lo suyo, hay una conexión entre los dos sistemas.

Ahora tomemos cada aparición de "cámara" en la discusión anterior y reemplacémosla por "tú". En lugar de tomar una foto con un aparato mecánico, imaginamos (de forma extravagante) que tienes muy buena vista y puedes ver dónde están los electrones con sólo mirarlos. De lo contrario, nada cambia. Según la ecuación de Schrödinger, una situación inicialmente desenredada -el electrón está en una superposición de varios lugares posibles, y no has mirado al electrón todavía- evoluciona suavemente en una enredada -una superposición de cada lugar en el que el electrón podría haber sido observado, y tú habiendo visto el electrón en ese lugar exactamente.

Eso es lo que dirían las reglas de la mecánica cuántica, si no hubiésemos añadido todas esas cosas molestas sobre el proceso de medición. Tal vez todas esas reglas extra fueron una pérdida de tiempo. En AQM, la historia que acabamos de contar, sobre usted y el electrón enredándose y evolucionando en una superposición, es la historia completa. No hay nada especial en la medición; es sólo algo que sucede cuando dos sistemas interactúan de manera apropiada. Y después, *tú y el sistema con el que interactuasteis están en una superposición*, en cada parte de la cual habéis visto el electrón en un lugar ligeramente diferente.

El problema es que esta historia todavía no coincide con lo que realmente experimentas cuando observas un sistema cuántico. Nunca sientes que has evolucionado en una superposición de diferentes resultados de medición posibles; simplemente piensas que has visto algún resultado específico, que puede ser predicho con una probabilidad definida. Es por eso que todas esas reglas de medición extra fueron añadidas en primer lugar. De lo contrario, parece que tienes un formalismo muy bonito y elegante (estados cuánticos, evolución suave) que simplemente no se ajusta a la realidad.

Es hora de ponerse un poco filosófico. ¿Qué es exactamente lo que queremos decir con "usted" en el párrafo anterior? Construir una teoría científica no es simplemente una cuestión de escribir algunas ecuaciones; también tenemos que indicar cómo esas ecuaciones se mapean en el mundo. Cuando se trata de usted y de mí, tendemos a pensar que el proceso de emparejarnos en alguna parte de un formalismo científico es bastante sencillo. Ciertamente en la historia que se ha contado anteriormente, donde un observador mide la posición de un electrón, definitivamente parece como si ese observador evolucionara en una superposición enmarañada de los diferentes resultados de medición posibles.

Pero hay una posibilidad alternativa. Antes de que se realizara la medición, había un electrón y un observador (o una cámara, si lo prefieres, no importa cómo pensemos sobre la cosa que interactúa con el electrón siempre y cuando sea un objeto grande y macroscópico). Sin embargo, después de que interactúan, en lugar de pensar que ese único observador ha evolucionado en una superposición de estados posibles, podríamos pensar que han evolucionado en *múltiples observadores posibles*. La forma correcta de describir las cosas después de la medición, según este punto de vista, no es como una persona con múltiples ideas sobre dónde se vio el electrón, sino como *múltiples mundos*, cada uno de los cuales contiene una sola persona con una idea muy definida sobre dónde se vio el electrón.

Aquí está la gran revelación: lo que hemos descrito como mecánica cuántica austera se conoce más comúnmente como la formulación de la mecánica cuántica de Everett, o de muchos mundos, propuesta por primera vez por Hugh Everett en 1957. El punto de vista de Everett surge de una molestia fundamental con todas las reglas especiales sobre las mediciones que se presentan como parte de la

receta cuántica estándar de los libros de texto, y sugiere en cambio que sólo hay un único tipo de evolución cuántica. El precio que pagamos por esta enorme y creciente elegancia del formalismo teórico es que la teoría describe muchas copias de lo que pensamos que es "el universo", cada una ligeramente diferente, pero cada una verdaderamente real en algún sentido. Si el beneficio vale la pena el costo es una cuestión sobre la que la gente no está de acuerdo. Lo es.

Al tropezar con la formulación de Muchos Mundos, en ningún momento tomamos la mecánica cuántica ordinaria y nos adentramos en un montón de universos. El potencial de tales universos siempre estuvo ahí, el universo tiene una función de onda, que puede describir de forma muy natural superposiciones de muchas formas diferentes en que las cosas podrían ser, incluyendo superposiciones de todo el universo. Todo lo que hicimos fue señalar que este potencial se actualiza naturalmente en el curso de la evolución cuántica ordinaria. Una vez que se admite que un electrón puede estar en una superposición de diferentes lugares, se deduce que una persona puede estar en una superposición de haber visto el electrón en diferentes lugares, y de hecho que la realidad en su conjunto puede estar en una superposición, y se hace natural tratar cada término en esa superposición como un "mundo" separado. No añadimos nada a la mecánica cuántica, sólo nos enfrentamos a lo que estaba ahí todo el tiempo.

Podríamos llamar al enfoque de Everett la "valiente" formulación de la mecánica cuántica. Encarna la filosofía de que debemos tomar en serio la versión más simple de la realidad subyacente que da cuenta de lo que vemos, incluso si esa realidad difiere salvajemente de nuestra experiencia cotidiana. ¿Tenemos el coraje de aceptarla?

Esta breve introducción a "Muchos Mundos" deja muchas preguntas sin respuesta. ¿Cuándo exactamente la función de la onda se divide en muchos mundos? ¿Qué separa a los mundos unos de otros? ¿Cuántos mundos hay? ¿Son los otros mundos realmente "reales"? ¿Cómo lo sabremos si no podemos observarlos? (¿O podemos?) ¿Cómo explica esto la probabilidad de que terminemos en un mundo en lugar de otro?

Todas estas preguntas tienen buenas respuestas, o al menos plausibles, y gran parte del libro que viene se dedicará a responderlas. Pero también debemos admitir que todo el panorama podría estar equivocado, y se requiere algo muy diferente.

Cada versión de la mecánica cuántica incluye dos cosas: 1) una función de onda, y 2) la ecuación de Schrödinger, que gobierna cómo las funciones de onda evolucionan en el tiempo. La totalidad de la formulación de Everett es simplemente la insistencia de que no hay *nada más*, que estos ingredientes son suficientes para proporcionar una completa y empíricamente adecuada cuenta del mundo. ("Empíricamente adecuado" es una forma elegante que a los filósofos les gusta decir "encaja con los datos"). Cualquier otro enfoque de la mecánica cuántica consiste en añadir algo a ese formalismo descarnado, o modificar de alguna manera lo que está ahí.

La implicación más inmediatamente sorprendente de la pura mecánica cuántica de Everet es la existencia de muchos mundos, por lo que tiene sentido llamarlo Muchos Mundos. Pero la esencia de la teoría es que la realidad se describe por una función de onda en suave evolución y nada más. Hay desafíos adicionales asociados a esta filosofía, especialmente cuando se trata de hacer coincidir la extraordinaria simplicidad del formalismo con la rica diversidad del mundo que observamos. Pero hay ventajas correspondientes de claridad y perspicacia. Como veremos cuando finalmente recurramos a la teoría de campos cuánticos y a la gravedad cuántica, tomar las funciones de onda como primarias por derecho propio, sin ningún bagaje heredado de nuestra experiencia clásica, es extraordinariamente útil para abordar los profundos problemas de la física moderna.

Dada la necesidad de estos dos ingredientes (funciones de onda y la ecuación de Schrödinger), hay algunas alternativas a Muchos Mundos que también podríamos considerar. Una es imaginar que se añaden nuevas entidades físicas además de la función de onda. Este enfoque conduce a modelos de variables ocultas, que estaban en la mente de gente como Einstein desde el principio. Hoy en día, el enfoque más popular se llama la *teoría de Broglie Bohm*, o simplemente mecánica de *Bohmian*. Alternativamente, podríamos dejar la función de onda por sí misma pero imaginarnos cambiando la ecuación de Schrödinger, por ejemplo, para introducir colapsos reales y aleatorios. Finalmente, podríamos imaginar que la función de onda no es una cosa física en absoluto, sino simplemente una forma de caracterizar lo que conocemos de la realidad. Tales enfoques son ampliamente conocidos como modelos epistémicos, y una versión actualmente popular es el *QBism*, o *Bayesianismo cuántico*.

Todas estas opciones -y hay muchas más que no se enumeran aquí- representan teorías físicas verdaderamente distintas, no simplemente "interpretaciones" de la misma idea subyacente. La

existencia de múltiples teorías incompatibles que todas conducen (al menos hasta ahora) a las predicciones observables de la mecánica cuántica crea un enigma para cualquiera que quiera hablar de lo que realmente significa la teoría cuántica. Mientras que la receta cuántica es acordada por científicos y filósofos en activo, la realidad subyacente -lo que significa realmente cualquier fenómeno *particular*- no lo es.

Defiendo una visión particular de esa realidad, la versión de la mecánica cuántica de Muchos Mundos, y durante la mayor parte de este libro simplemente explicaré las cosas en términos de Muchos Mundos. Esto no debe ser tomado para implicar que el punto de vista de Everet es incuestionablemente correcto. Espero explicar lo que la teoría dice, y por qué es razonable asignar un alto crédito a que es la mejor visión de la realidad que tenemos; lo que personalmente termines creyendo depende de ti.

---

* Si buscas en Internet, encontrarás numerosas atribuciones de "¡Cállate y calcula!" a Richard Feynman, un físico que fue un gran maestro en hacer cálculos difíciles. Pero nunca dijo tal cosa, ni tampoco hubiera encontrado el sentimiento agradable; Feynman pensó cuidadosamente en la mecánica cuántica, y nadie le acusó nunca de callarse. Es común que las citas sean reatribuidas a oradores plausibles que son más famosos que la fuente real de la cita. El sociólogo Robert Merton lo ha llamado el Efecto Mateo, según una línea del Evangelio de Mateo: "Porque a todo el que tiene se le dará y tendrá en abundancia, pero al que no tiene se le quitará hasta lo que tiene."

3

¿Por qué alguien pensaría esto?

Cómo llegó a ser la mecánica cuántica

"A veces he creído hasta seis cosas imposibles antes del desayuno", señala la Reina Blanca a Alicia en *A través del espejo*. Eso puede parecer una habilidad útil cuando uno se enfrenta a la mecánica cuántica en general, y a muchos mundos en particular. Afortunadamente, las cosas que parecen imposibles no son invenciones caprichosas o koanes Zen que rompen la lógica; son características del mundo que nos empujan a aceptar porque los experimentos reales nos han arrastrado, pataleando y gritando, en esa dirección. No elegimos la mecánica cuántica; sólo elegimos enfrentarnos a ella.

La física aspira a averiguar de qué tipo de cosas está hecho el mundo, cómo cambian naturalmente con el tiempo y cómo interactúan entre sí. En mi propio entorno, puedo ver inmediatamente muchos tipos diferentes de cosas: papeles y libros y un escritorio y un ordenador y una taza de café y una papelera y dos gatos (uno de los cuales está muy interesado en lo que hay dentro de la papelera), por no mencionar cosas menos sólidas como el aire y la luz y el sonido.

A finales del siglo XIX, los científicos habían logrado destilar cada una de estas cosas hasta dos tipos fundamentales de sustancias: *partículas* y *campos*. Las partículas son objetos puntuales en un lugar determinado del espacio, mientras que los campos (como el campo gravitatorio) se extienden por todo el espacio, adquiriendo un valor particular en cada punto. Cuando un campo oscila a través del espacio y el tiempo, lo llamamos "onda". Así que la gente a menudo contrastará las partículas con las ondas, pero lo que realmente quieren decir es partículas y campos.

La mecánica cuántica finalmente unificó las partículas y los campos en una sola entidad, la función de onda. El impulso para hacerlo vino de dos direcciones: primero, los físicos descubrieron que las cosas que pensaban que eran ondas, como los campos eléctricos y magnéticos, tenían propiedades similares a las de las partículas. Luego se dieron cuenta de que las cosas que pensaban que eran partículas, como los electrones, manifestaban propiedades similares a las de los campos. La reconciliación de estos rompecabezas es que el mundo es fundamentalmente similar al campo (es una función de onda cuántica), pero cuando lo miramos realizando una cuidadosa medición, se ve como una partícula. Llevó un tiempo llegar allí.

Las partículas parecen ser cosas bastante sencillas: objetos ubicados en puntos particulares del espacio. La idea se remonta a la antigua Grecia, donde un pequeño grupo de filósofos propuso que la materia estaba compuesta de "átomos" puntuales, para la palabra griega "indivisible". En palabras de Demócrito, el atomista original, "Lo dulce es por convención, lo amargo por convención, lo caliente por convención, lo frío por convención, el color por convención; en realidad sólo hay átomos y el vacío."

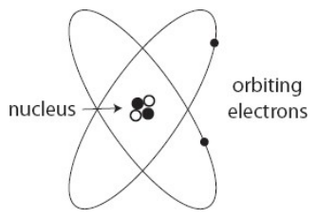
En ese momento no había muchas pruebas reales a favor de la propuesta, por lo que fue abandonada en gran medida hasta principios del siglo XIX, cuando los experimentadores comenzaron a estudiar las reacciones químicas de manera cuantitativa. Un papel crucial lo jugó el óxido de estaño, un compuesto hecho de estaño y oxígeno, que se descubrió que venía en dos formas diferentes. El científico inglés John Dalton observó que para una cantidad fija de estaño, la cantidad de oxígeno en una forma de óxido de estaño era exactamente el doble de la cantidad en la otra. Podríamos explicar esto, argumentó Dalton en 1803, si ambos elementos vinieran en forma de partículas discretas, para lo cual tomó prestada la palabra "átomo" de los griegos. Todo lo que tenemos que hacer es imaginar que una forma de óxido de estaño estaba hecha de un solo átomo de estaño combinado con un solo átomo de oxígeno, mientras que la otra forma consistía en un solo átomo de estaño combinado con dos átomos de oxígeno. Cada tipo de elemento químico, sugirió Dalton, estaba asociado con un tipo único de átomo, y la tendencia de los átomos a combinarse de diferentes maneras era responsable de toda la química. Un resumen simple, pero con implicaciones que alteran el mundo.

Dalton se precipitó un poco con su nomenclatura. Para los griegos, el objetivo de los átomos era que fueran indivisibles, los bloques de construcción fundamentales de los que todo lo demás está hecho. Pero los átomos de Dalton no son en absoluto indivisibles, sino que consisten en un núcleo compacto rodeado de electrones en órbita. Sin embargo, llevó más de cien años darse cuenta de eso.

Primero el físico inglés J. J. Thomson descubrió los electrones en 1897. Parecían ser un tipo de partícula completamente nueva, cargada eléctricamente y con sólo 1/1800 de la masa del hidrógeno, el átomo más ligero. En 1909 el antiguo estudiante de Thomson, Ernest Rutherford, un físico neozelandés que se había mudado al Reino Unido para sus estudios avanzados, mostró que la mayor parte de la masa del átomo estaba concentrada en un núcleo central, mientras que el tamaño total del átomo estaba determinado por las órbitas de electrones mucho más ligeros que viajaban alrededor de ese núcleo. La imagen estándar de un átomo, con electrones rodeando el núcleo como los planetas que orbitan el sol en nuestro sistema solar, representa este modelo de Rutherford de la estructura atómica. (Rutherford no sabía nada de mecánica cuántica, así que esta caricatura se desvía de la realidad de manera significativa, como veremos).

Trabajos posteriores, iniciados por Rutherford y seguidos por otros, revelaron que los núcleos en sí mismos no son elementales, sino que consisten en protones cargados positivamente y neutrones sin carga. Las cargas eléctricas de los electrones y los protones son iguales en magnitud pero opuestas en signo, por lo que un átomo con un número igual de cada uno (y cuantos neutrones se desee) será eléctricamente neutro. No fue hasta los años 60 y 70 que los físicos establecieron que los protones y los neutrones también están hechos de partículas más pequeñas, llamadas quarks, que se mantienen unidas por nuevas partículas portadoras de fuerza llamadas gluones.

Rutherford Atom



Químicamente hablando, los electrones están donde están. Los núcleos le dan a los átomos su peso, pero fuera de los raros decaimientos radioactivos o las reacciones de fisión/fusión, básicamente van a lo largo del camino. Los electrones en órbita, por otro lado, son ligeros y saltarines, y su tendencia a moverse es lo que hace nuestras vidas interesantes. Dos o más átomos pueden compartir electrones, lo que conduce a enlaces químicos. Bajo las condiciones adecuadas, los electrones pueden cambiar de opinión sobre los átomos con los que quieren asociarse, lo que nos da reacciones químicas. Los electrones pueden incluso escapar completamente de su cautiverio atómico para moverse libremente a través de una sustancia, un fenómeno que llamamos "electricidad". Y cuando agitas un electrón, éste establece una vibración en los campos eléctricos y magnéticos a su alrededor, conduciendo a la luz y a otras formas de radiación electromagnética.

Para enfatizar la idea de ser verdaderamente puntual, en lugar de un objeto pequeño pero con algún tamaño definido distinto de cero, a veces distinguimos entre partículas "elementales", que definen puntos literales en el espacio, y partículas "compuestas" que en realidad están hechas de componentes aún más pequeños. Por lo que cualquiera puede decir, los electrones son realmente partículas elementales. Se puede ver por qué las discusiones de la mecánica cuántica se refieren constantemente a los electrones cuando llegan a los ejemplos: son la partícula fundamental más fácil de hacer y manipular, y juegan un papel central en el comportamiento de la materia de la que estamos hechos nosotros y nuestro entorno.

En malas noticias para Demócrito y sus amigos, la física del siglo XIX no explicó el mundo sólo en términos de partículas. Sugirió, en cambio, que se necesitaban dos tipos fundamentales de cosas: tanto partículas como campos.

Los campos pueden ser considerados como lo opuesto a las partículas, al menos en el contexto de la mecánica clásica. La característica que define a una partícula es que está ubicada en un punto del espacio, y en ningún otro lugar. El rasgo definitorio de un campo es que está ubicado en todas partes. Un campo es algo que tiene un valor en literalmente cada punto del espacio. Las partículas necesitan interactuar entre sí de alguna manera, y lo hacen a través de la influencia de los campos.

Piensa en el campo magnético. Es un *campo vectorial, en* cada punto del espacio parece una pequeña flecha, con una magnitud (el campo puede ser fuerte, o débil, o incluso exactamente cero) y también una dirección (apunta a lo largo de algún eje en particular). Podemos medir la dirección en la

que apunta el campo magnético simplemente sacando una brújula magnética y observando en qué dirección apunta la aguja. (Apuntará aproximadamente al norte, si se encuentra en la mayoría de los lugares de la Tierra y no está demasiado cerca de otro imán). Lo importante es que el campo magnético existe invisiblemente en todo el espacio, incluso cuando no lo estamos observando. Eso es lo que hacen los campos.

También está el campo eléctrico, que también es un vector con una magnitud y una dirección en cada punto del espacio. Así como podemos detectar un campo magnético con una brújula, podemos detectar el campo eléctrico poniendo un electrón en reposo y viendo si se acelera. Cuanto más rápida sea la aceleración, más fuerte será el campo eléctrico. * Uno de los triunfos de la física del siglo XIX fue cuando James Clerk Maxwell unificó la electricidad y el magnetismo, mostrando que ambos campos podían pensarse como diferentes manifestaciones de un único campo "electromagnético" subyacente.

El otro campo que era bien conocido en el siglo XIX es el campo gravitacional. La gravedad, nos enseñó Isaac Newton, se extiende a distancias astronómicas. Los planetas del sistema solar sienten una atracción gravitatoria hacia el sol, proporcional a la masa del sol e inversamente proporcional al cuadrado de la distancia entre ellos. En 1783 Pierre-Simon Laplace demostró que podemos pensar que la gravedad newtoniana surge de un "campo potencial gravitatorio" que tiene un valor en cada punto del espacio, al igual que los campos eléctrico y magnético.

A finales del siglo XIX, los físicos pudieron ver los contornos de una teoría completa del mundo enfocada. La materia estaba compuesta por átomos, que estaban hechos de partículas más pequeñas, interactuando a través de varias fuerzas transportadas por campos, todas operando bajo el paraguas de la mecánica clásica.

De qué está hecho el mundo (Edición del siglo XIX)

- Partículas (como un punto, que inventa la materia).
- Campos (penetrando en el espacio, dando lugar a fuerzas).

Nuevas partículas y fuerzas serían descubiertas en el transcurso del siglo XX, pero en el año 1899 no habría sido una locura pensar que el cuadro básico estaba bajo control. La revolución cuántica acechaba a la vuelta de la esquina, en gran parte insospechada.

Si has leído algo sobre la mecánica cuántica antes, probablemente has oído la pregunta "¿Es un electrón una partícula o una onda?" La respuesta es: "Es una onda, pero cuando miramos (es decir, medimos) esa onda, parece una partícula". Esa es la novedad fundamental de la mecánica cuántica. Sólo hay un tipo de cosa, la función de la onda cuántica, pero cuando se observa en las circunstancias adecuadas nos parece que es como una partícula.

De qué está hecho el mundo (Siglo XX y más allá)

- Una función de onda cuántica.

Se necesitaron varios avances conceptuales para pasar de la imagen del mundo del siglo XIX (partículas clásicas y campos clásicos) a la síntesis del siglo XX (una única función de onda cuántica). La historia de cómo las partículas y los campos son diferentes aspectos de la misma cosa subyacente es uno de los éxitos menos apreciados de la búsqueda de la unificación en la física.

Para llegar allí, los físicos de principios del siglo XX necesitaban apreciar dos cosas: los campos (como el electromagnetismo) pueden comportarse de forma parecida a las partículas, y las partículas (como los electrones) pueden comportarse de forma parecida a las ondas.

El comportamiento de las partículas de los campos fue lo primero que se apreció. Cualquier partícula con una carga eléctrica, como un electrón, crea un campo eléctrico en todas partes a su alrededor, desapareciendo en magnitud a medida que se aleja de la carga. Si agitamos un electrón, oscilando de arriba a abajo, el campo oscila junto con él, en ondas que se extienden gradualmente desde su ubicación. Esto es radiación electromagnética, o "luz" para abreviar. Cada vez que calentamos un material a una temperatura suficiente, los electrones en sus átomos , y el material comienza a brillar. Esto se conoce como radiación de *cuerpo negro*, y cada objeto con una temperatura uniforme emite una forma de radiación de cuerpo negro.

La luz roja corresponde a ondas de baja frecuencia que oscilan lentamente, mientras que la luz azul corresponde a ondas de alta frecuencia que oscilan rápidamente. Dado lo que los físicos sabían sobre los átomos y los electrones a principios de siglo, pudieron calcular cuánta radiación debería emitir un cuerpo negro en cada frecuencia diferente, el llamado espectro de cuerpo negro. Sus cálculos funcionaron bien para las bajas frecuencias, pero se volvieron cada vez menos precisos a medida que se fueron acercando a las frecuencias más altas, prediciendo en última instancia una cantidad infinita de radiación procedente de cada cuerpo material. Esto se denominó más tarde la "catástrofe ultravioleta", refiriéndose a las frecuencias invisibles incluso más altas que la luz azul o violeta.

Finalmente, en 1900, el físico alemán Max Planck fue capaz de derivar una fórmula que se ajustaba exactamente a los datos. El truco importante era proponer una idea radical: que cada vez que se emitía luz, ésta llegaba en forma de una cantidad particular -un "quantum"- de energía, que estaba relacionada con la frecuencia de la luz. Cuanto más rápido oscile el campo electromagnético, más energía tendrá cada emisión.

En el proceso, Planck se vio obligado a plantear la existencia de un nuevo parámetro fundamental de la naturaleza, ahora conocido como *la constante de Planck* y denotado por la letra *h*. La cantidad de energía contenida en un cuanto de luz es proporcional a su frecuencia, y la constante de Planck es la constante de proporcionalidad: la energía es la frecuencia veces *h*. Muy a menudo es más conveniente utilizar una versión modificada ħ, que se pronuncia "h-bar", que es sólo la constante original *h de* Planck dividida por 2π. La aparición de la constante de Planck en una expresión es una señal de que la mecánica cuántica está trabajando.

El descubrimiento de Planck de su constante sugirió una nueva forma de pensar sobre las unidades físicas, como la energía, la masa, la longitud o el tiempo. La energía se mide en unidades como ergs o julios o kilovatios-hora, mientras que la frecuencia se mide en unidades de 1/tiempo, ya que la frecuencia nos dice cuántas veces ocurre algo en una cantidad de tiempo determinada. Para hacer que la energía sea proporcional a la frecuencia, la constante de Planck tiene, por lo tanto, unidades de energía por tiempo. El propio Planck se dio cuenta de que su nueva cantidad podía combinarse con las otras constantes fundamentales - G, la constante de Newton de la gravedad, y *c*, la velocidad de la luz - para formar medidas universalmente definidas de longitud, tiempo, etc. La longitud de Planck es de unos 10-33 centímetros, mientras que el tiempo de Planck es de unos 10-43 segundos. La longitud de Planck es una distancia muy corta en realidad, pero presumiblemente tiene relevancia física, como una escala en la que la mecánica cuántica (*h*), la gravedad (*G)*, y la relatividad (*c) son todas simultáneamente* materia.

Curiosamente, la mente de Planck se dirigió inmediatamente a la posibilidad de comunicarse con civilizaciones alienígenas. Si algún día empezamos a charlar con seres extraterrestres usando señales de radio interestelares, no sabrán lo que queremos decir si decimos que los seres humanos tienen "unos dos metros de altura". Pero como presumiblemente sabrán al menos tanto de física como nosotros, deberían estar al tanto de las unidades de Planck. Esta sugerencia aún no se ha puesto en práctica, pero la constante de Planck ha tenido un inmenso impacto en otros lugares.

La idea de que la luz se emite en cantidades discretas de energía relacionadas con su frecuencia es desconcertante, cuando se piensa en ello. Por lo que sabemos intuitivamente sobre la luz, podría tener sentido que alguien sugiriera que la cantidad de energía que transportaba dependía de lo *brillante que* era, pero no del *color que tenía*. Pero la suposición llevó a Planck a derivar la fórmula correcta, así que algo de la idea parecía funcionar.

Se dejó a Albert Einstein, a su singular manera, para que se deshiciera de la sabiduría convencional y diera un dramático salto hacia una nueva forma de pensar. En 1905, Einstein sugirió que la luz se emitía sólo a ciertas energías porque literalmente consistía en paquetes discretos, no en una onda suave. La luz eran partículas, en otras palabras, "fotones", como se conocen hoy en día. Esta idea, de que la luz viene en cantidades de energía discretas, como partículas, fue el verdadero nacimiento de la mecánica cuántica, y fue el descubrimiento por el que Einstein fue galardonado con el Premio Nobel en 1921. (Se merecía ganar al menos un Nobel más por la teoría de la relatividad, pero nunca lo hizo.) Einstein no era ningún tonto, y sabía que esto era algo importante; como le dijo a su amigo Conrad Habicht, su ligera propuesta cuántica era "muy revolucionaria".

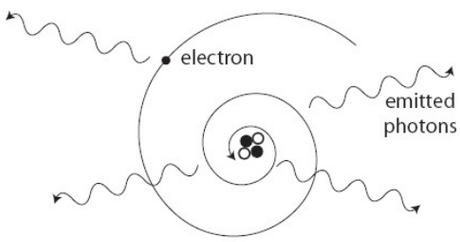
Obsérvese la sutil diferencia entre la sugerencia de Planck y la de Einstein. Planck dice que la luz de una frecuencia fija se *emite* en ciertas cantidades de energía, mientras que Einstein dice que es porque la luz *es literalmente* partículas discretas. Es la diferencia entre decir que una cierta máquina de café hace exactamente una taza a la vez, y decir que el café sólo existe en forma de cantidades de un tamaño de una taza. Eso podría tener sentido cuando hablamos de partículas de materia como electrones y protones, pero sólo unas décadas antes Maxwell había explicado triunfalmente que la luz era una onda, no una partícula. La propuesta de Einstein amenazaba con deshacer ese triunfo. El

propio Planck era reacio a aceptar esta nueva idea salvaje, pero explicaba los datos. En la búsqueda de aceptación de una nueva y salvaje idea, es una poderosa ventaja a tener.

Mientras tanto otro problema estaba al acecho en el lado de las partículas del libro mayor, donde el modelo de Rutherford explicaba los átomos en términos de electrones que orbitan alrededor de los núcleos.

Recuerda que si agitas un electrón, éste emite luz. Por "agitar" nos referimos a acelerar de alguna manera. Un electrón que hace cualquier otra cosa que no sea moverse en línea recta a una velocidad constante debería emitir luz.

De la imagen del átomo de Rutherford, con electrones orbitando alrededor del núcleo, ciertamente parece que esos electrones no se mueven en línea recta. Se mueven en círculos o elipses. En un mundo clásico, eso significa inequívocamente que los electrones están siendo acelerados, e igualmente inequívocamente que deberían estar emitiendo luz. Cada átomo de su cuerpo, y en el entorno que le rodea, debería estar brillando, si la mecánica clásica estaba en lo cierto. Esto significa que los electrones deberían estar perdiendo energía al emitir radiación, lo que a su vez implica que deberían girar en espiral hacia abajo en el núcleo central. Clásicamente, las órbitas de los electrones no deberían ser estables.



Instability of the classical Rutherford atom

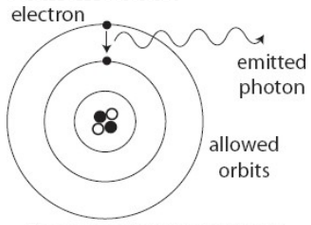
Tal vez todos tus átomos estén emitiendo luz, pero es demasiado débil para verlo. Después de todo, la misma lógica se aplica a los planetas del sistema solar. Deberían estar emitiendo ondas gravitatorias, una masa acelerada debería causar ondas en el campo gravitatorio, al igual que una carga acelerada causa ondas en el campo electromagnético. Y de hecho lo son. Si había alguna duda de que esto ocurriera, fue barrida en 2016, cuando los investigadores de los observatorios de ondas gravitatorias LIGO y Virgo anunciaron la primera detección directa de ondas gravitatorias, creadas cuando agujeros negros a más de mil millones de años luz de distancia se convirtieron en espirales unos con otros.

Pero los planetas del sistema solar son mucho más pequeños y se mueven más lentamente que esos agujeros negros, que tenían cada uno más de treinta veces la masa del sol. Como resultado, las ondas gravitacionales emitidas por nuestros vecinos planetarios son muy débiles. La potencia emitida en las ondas gravitatorias por la Tierra en órbita asciende a unos 200 vatios, equivalente a la potencia de unas pocas bombillas, y completamente insignificante en comparación con otras influencias como la radiación solar y las fuerzas de marea. Si pretendemos que la emisión de ondas gravitatorias fuera lo la órbita de la Tierra, se necesitarían más de 1023 años para que se estrellara contra el sol. Así que quizás lo mismo es cierto para los átomos: quizás las órbitas de los electrones no son realmente estables, pero son lo suficientemente estables.

Esta es una cuestión cuantitativa, y no es difícil conectar los números y ver lo que cae. La respuesta es catastrófica, porque los electrones deberían moverse mucho más rápido que los planetas y el electromagnetismo es una fuerza mucho más fuerte que la gravedad. La cantidad de tiempo que le tomaría a un electrón para chocar con el núcleo de su átomo es de unos diez picosegundos. Eso es una cien mil millonésima de segundo. Si la materia ordinaria hecha de átomos sólo durara ese tiempo, alguien ya lo habría notado.

Esto molestó a mucha gente, sobre todo a Niels Bohr, que había trabajado brevemente bajo Rutherford en 1912. En 1913, Bohr publicó una serie de tres trabajos, más tarde conocidos simplemente como "la trilogía", en los que expuso otra de esas audaces ideas fuera de lo común que caracterizaron los primeros años de la teoría cuántica. ¿Qué pasaría si, preguntó, los electrones no pueden descender en espiral hasta los núcleos atómicos porque simplemente no se les permite estar en la órbita que quieran, sino que tienen que atenerse a ciertas órbitas muy específicas? Habría una órbita de energía mínima, otra con una energía algo más alta, y así sucesivamente. Pero a los electrones

no se les permitía acercarse más al núcleo que a la órbita más baja, y no se les permitía estar entre las órbitas. Las órbitas permitidas estaban cuantificadas.



Electrons can jump between allowed orbits in the Bohr atom

La propuesta de Bohr no era tan extravagante como podría parecer al principio. Los físicos habían estudiado cómo la luz interactuaba con diferentes elementos en su forma gaseosa - hidrógeno, nitrógeno, oxígeno, etc. Descubrieron que si se hacía brillar la luz a través de un gas frío, parte de ella sería absorbida; de la misma manera, si se hacía pasar corriente eléctrica a través de un tubo de gas, el gas comenzaría a brillar (el principio detrás de las luces fluorescentes que aún se utilizan hoy en día). Pero sólo emitían y absorbían ciertas frecuencias muy específicas de luz, dejando pasar otros colores. El hidrógeno, el elemento más simple con un solo protón y un solo electrón, en particular, tenía un patrón muy regular de frecuencias de emisión y absorción.

Para un átomo clásico de Rutherford, eso no tendría ningún sentido. Pero en el modelo de Bohr, donde sólo se permitían ciertas órbitas de electrones, había una explicación inmediata. Aunque los electrones no podían permanecer entre las órbitas permitidas, podían *saltar* de una a otra. Un electrón podía caer de una órbita de mayor energía a una de menor energía emitiendo luz con la energía justa para compensar, o podía saltar hacia arriba en energía absorbiendo una cantidad apropiada de energía de la luz ambiental. Debido a que las órbitas en sí mismas estaban cuantificadas, sólo deberíamos ver energías específicas de luz interactuando con los electrones. Junto con la idea de Planck de que la frecuencia de la luz está relacionada con su energía, esto explicaba por qué los físicos veían sólo ciertas frecuencias emitidas o absorbidas.

Al comparar sus predicciones con la emisión de luz observada por el hidrógeno, Bohr pudo no sólo suponer que sólo se permitían algunas órbitas de electrones, sino también calcular cuáles eran. Cualquier partícula en órbita tiene una cantidad llamada momento *angular,* que es fácil de calcular: es sólo la masa de la partícula, multiplicada por su velocidad, multiplicada por su distancia al centro de la órbita. Bohr propuso que una órbita de electrones permitida era aquella cuyo momento angular era un múltiplo de una constante fundamental particular. Y cuando comparó la energía que los electrones deberían emitir al saltar entre órbitas con lo que se veía realmente en la luz emitida por el gas de hidrógeno, pudo averiguar cuál debía ser esa constante para ajustarse a los datos. La respuesta fue la constante de Planck, h. O más específicamente, la versión modificada de la barra-h, $\hbar = h/2\pi$.

Ese es el tipo de cosas que te hacen pensar que estás en el camino correcto. Bohr estaba tratando de explicar el comportamiento de los electrones en los átomos, y propuso una regla ad hoc según la cual sólo podían moverse a lo largo de ciertas órbitas cuantizadas, y para encajar los datos su regla terminó requiriendo una nueva constante de la naturaleza, y esa nueva constante era la misma que la nueva constante que Planck se vio obligado a inventar cuando trataba de explicar el comportamiento de los fotones. Todo esto puede parecer destartalado y un poco incompleto, pero en conjunto parecía como si algo profundo estuviera sucediendo en el reino de los átomos y partículas, algo que no encajaba cómodamente con las reglas sagradas de la mecánica clásica. Las ideas de este período se describen ahora a veces bajo la rúbrica de "la vieja teoría cuántica", en contraposición a la "nueva teoría cuántica" de Heisenberg y Schrödinger que apareció a finales de los años 20.

Por muy provocativa y provisionalmente exitosa que fuera la vieja teoría cuántica, nadie estaba realmente contento con ella. La idea de Planck y Einstein de los cuantos de luz ayudó a dar sentido a una serie de resultados experimentales, pero fue difícil de reconciliar con el enorme éxito de la teoría de Maxwell de la luz como ondas electromagnéticas. La idea de Bohr de las órbitas de electrones cuantificados ayudó a dar sentido a la luz emitida y absorbida por el hidrógeno, pero parecía sacada de un sombrero, y no funcionaba realmente para otros elementos que no fueran el hidrógeno. Incluso antes de que la "vieja teoría cuántica" recibiera ese nombre, parecía claro que eran sólo indicios de algo mucho más profundo.

Una de las características menos satisfactorias del modelo de Bohr era la sugerencia de que los electrones podían "saltar" de una órbita a otra. Si un electrón de baja energía absorbiera la luz con una cierta cantidad de energía, tiene sentido que tuviera que saltar a otra órbita con la cantidad justa de energía adicional. Pero cuando un electrón en una órbita de alta energía emitía luz para saltar hacia abajo, parecía tener la opción de elegir exactamente hasta dónde bajar, en qué órbita más baja terminar. ¿Qué hizo esa elección? El mismo Rutherford se preocupó por esto en una carta a Bohr:

> Me parece que hay una grave dificultad en su hipótesis, que no tengo dudas de que usted comprende plenamente, a saber, ¿cómo decide un electrón a qué frecuencia va a vibrar cuando pasa de un estado estacionario a otro? Me parece que usted tendría que asumir que el electrón sabe de antemano dónde se va a detener.

Este asunto de los electrones "decidiendo" a dónde ir prefiguró una ruptura mucho más drástica con el paradigma de la física clásica de lo que los físicos en 1913 estaban dispuestos a contemplar. En la mecánica newtoniana uno podría imaginar un demonio de Laplace que pudiera predecir, al menos en principio, toda la historia futura del mundo desde su estado actual. En este punto del desarrollo de la mecánica cuántica, nadie se enfrentaba realmente a la perspectiva de que esta imagen tuviera que ser completamente descartada.

Tomó más de diez años para que un marco más completo, la "nueva teoría cuántica", finalmente apareciera en escena. De hecho, se propusieron dos ideas en competencia en ese momento, la mecánica matricial y la mecánica ondulatoria, antes de que finalmente se demostrara que eran versiones matemáticamente equivalentes de la misma cosa, que ahora puede ser simplemente llamada mecánica cuántica.

La mecánica de la matriz fue formulada inicialmente por Werner Heisenberg, que había trabajado con Niels Bohr en Copenhague. Estos dos hombres, junto con su colaborador Wolfgang Pauli, son responsables de la interpretación de la mecánica cuántica en Copenhague, aunque ellos creían exactamente en lo que es un tema de debate histórico y filosófico en curso.

El enfoque de Heisenberg en 1926, reflejando la audacia de una generación más joven que llegaba a la escena, era dejar de lado las preguntas sobre lo que realmente ocurría en un sistema cuántico, y centrarse exclusivamente en la explicación de lo observado por los experimentadores. Bohr había postulado órbitas de electrones cuantizados sin explicar por qué se permitían algunas órbitas y otras no. Heisenberg prescindió por completo de las órbitas. Olvídese de lo que hace el electrón; pregunte sólo lo que puede observar al respecto. En la mecánica clásica, un electrón se caracterizaría por la posición y el momento. Heisenberg mantuvo esas palabras, pero en lugar de pensar en ellas como cantidades que existen, ya sea que las estemos viendo o no, pensó en ellas como posibles resultados de las mediciones. Para Heisenberg, los saltos impredecibles que habían molestado a Rutherford y a otros se convirtieron en una parte central de la mejor forma de hablar del mundo cuántico.

Heisenberg tenía sólo veinticuatro años cuando formuló por primera vez la mecánica de la matriz. Era claramente un prodigio, pero estaba lejos de ser una figura establecida en el campo, y no obtendría un puesto académico permanente hasta un año después. En una carta a Max Born, otro de sus mentores, Heisenberg se preocupó de que "había escrito un artículo loco y no se atrevió a enviarlo para su publicación". Pero en colaboración con Born y el aún más joven físico Pascual Jordan, fueron capaces de poner la mecánica de matrices sobre una base clara y matemáticamente sólida.

Habría sido natural que Heisenberg, Born y Jordan compartieran el Premio Nobel por el desarrollo de la mecánica de la matriz, y de hecho Einstein los nominó para el premio. Pero fue sólo Heisenberg quien fue honrado por el comité del Nobel en 1932. Se ha especulado que la inclusión de Jordan habría sido problemática, ya que se hizo conocido por su agresiva retórica política de derechas, convirtiéndose finalmente en miembro del Partido Nazi y uniéndose a una unidad de *Sturmabteilung* (soldado de asalto). Sin embargo, al mismo tiempo, sus compañeros nazis lo consideraban poco fiable, debido a su apoyo a Einstein y a otros científicos judíos. Al final, Jordania nunca ganó el premio. Born también quedó fuera del premio por la mecánica de la matriz, pero esa omisión se compensó cuando se le concedió un Nobel por separado en 1954 por su formulación de la regla de la probabilidad. Esa fue la última vez que se otorgó un Premio Nobel por el trabajo en los fundamentos de la mecánica cuántica.

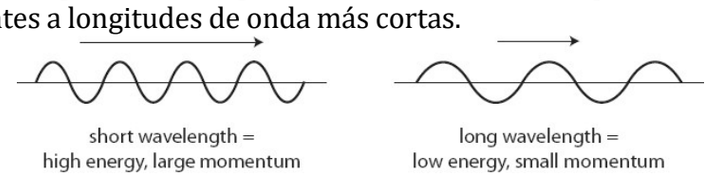
Tras el inicio de la Segunda Guerra Mundial, Heisenberg dirigió un programa del gobierno alemán para desarrollar armas nucleares. Lo que Heisenberg realmente pensaba de los nazis, y si realmente trató lo más duro posible de impulsar el programa de armas, son asuntos de alguna disputa histórica. Parece que, al igual que otros alemanes, Heisenberg no le gustaba el Partido Nazi, pero prefería una victoria alemana en el conflicto a la perspectiva de ser atropellado por los soviéticos. No hay pruebas de que trabajara activamente para sabotear el programa de bombas nucleares, pero está claro que su

equipo hizo muy pocos progresos. En parte esto debe atribuirse al hecho de que tantos brillantes físicos judíos habían huido de Alemania cuando los nazis tomaron el poder.

Por muy impresionante que fuera la mecánica matricial, sufría un grave defecto de comercialización: el formalismo matemático era muy abstracto y difícil de entender. La reacción de Einstein a la teoría fue típica: "Un verdadero cálculo de hechicero. Es lo suficientemente ingenioso y protegido por su gran complejidad, como para ser inmune a cualquier prueba de su falsedad". (Esto del tipo que había propuesto describir el espacio tiempo en términos de geometría no euclidiana). La mecánica ondulatoria, desarrollada inmediatamente después por Erwin Schrödinger, era una versión de la teoría cuántica que utilizaba conceptos con los que los físicos ya estaban muy familiarizados, lo que ayudó enormemente a acelerar la aceptación del nuevo paradigma.

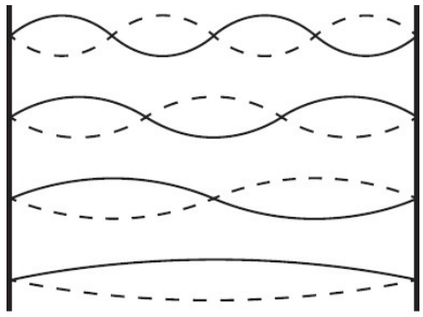
Los físicos habían estudiado las ondas durante mucho tiempo, y con la formulación de Maxwell del electromagnetismo como una teoría de campos, se habían vuelto adeptos a pensar en ellas. Los primeros indicios de la mecánica cuántica, de Planck y Einstein, habían estado alejados de las ondas y hacia las partículas. Pero el átomo de Bohr sugirió que incluso las partículas no eran lo que parecían ser.

En 1924, el joven físico francés Louis de Broglie pensaba en los cuantos de luz de Einstein. En ese momento la relación entre los fotones y las ondas electromagnéticas clásicas era todavía turbia. Una cosa obvia a contemplar era que la luz consistía tanto en una partícula como en una onda: los fotones parecidos a las partículas podían ser transportados por las conocidas ondas electromagnéticas. Y si eso es cierto, no hay razón para que no podamos imaginar lo mismo con los electrones, tal vez hay algo parecido a una onda que lleva las partículas de electrones. Eso es exactamente lo que de Broglie sugirió en su tesis doctoral de 1924, proponiendo una relación entre el momento y la longitud de onda de estas "ondas de materia" que era análoga a la fórmula de Planck para la luz, con momentos más grandes correspondientes a longitudes de onda más cortas.



Como muchas sugerencias de la época, la hipótesis de de Broglie puede haber parecido un poco ad hoc, pero sus implicaciones fueron de gran alcance. En particular, era natural preguntarse cuáles serían las implicaciones de las ondas de materia para los electrones que orbitan alrededor de un núcleo. Se sugirió una respuesta notable: para que la onda se estableciera en una configuración estacionaria, su longitud de onda debía ser un múltiplo exacto de la circunferencia de una órbita correspondiente. Las órbitas cuantizadas de Bohr podían derivarse en lugar de simplemente postularse, simplemente asociando las ondas con las partículas de electrones que rodeaban el núcleo.

Considere una cuerda con sus extremos fijos, como en una guitarra o violín. Aunque cualquier punto puede moverse hacia arriba o hacia abajo como quiera, el comportamiento general de la cuerda está limitado por estar atada en cualquiera de sus extremos. Como resultado, la cuerda sólo vibra a ciertas longitudes de onda especiales, o combinaciones de ellas; por eso las cuerdas de los instrumentos musicales emiten notas claras en lugar de un ruido indistinto. Estas vibraciones especiales se llaman los *modos de* la cuerda. La naturaleza esencialmente "cuántica" del mundo subatómico, en este cuadro, se produce no porque la realidad esté realmente subdividida en distintos trozos, sino porque hay modos vibratorios naturales para las ondas de las que están hechos los sistemas físicos.



Allowed wavelengths (modes)
of a string with ends tied down

La palabra "cuántico", que se refiere a una cantidad definida de cosas, puede dar la impresión de que la mecánica cuántica describe un mundo fundamentalmente discreto y pixelado, como cuando se hace un zoom de cerca en el monitor de una computadora o en la pantalla de un televisor. En realidad es lo contrario; la mecánica cuántica describe el mundo como una función de onda suave. Pero en las circunstancias adecuadas, donde las partes individuales de la función de la onda están atadas de cierta manera, la onda toma la forma de una combinación de distintos modos de vibración. Cuando observamos tal sistema, vemos esas posibilidades discretas. Eso es cierto para las órbitas de los electrones, y también explicará por qué los campos cuánticos parecen conjuntos de partículas individuales. En la mecánica cuántica, el mundo es fundamentalmente ondulado; su aparente discreción cuántica proviene de la forma particular en que esas ondas son capaces de vibrar.

Las ideas de De Broglie eran intrigantes, pero no proporcionaban una teoría completa. Eso se dejó a Erwin Schrödinger, quien en 1926 presentó una comprensión dinámica de las funciones de las ondas, incluyendo la ecuación a la que obedecen, que más tarde fue nombrada en su honor. Las revoluciones en la física son generalmente un juego de jóvenes, y la mecánica cuántica no era diferente, pero Schrödinger se opuso a la tendencia. Entre los líderes de las discusiones en Solvay en 1927, Einstein a los cuarenta y ocho años, Bohr a los cuarenta y dos, y Born a los cuarenta y cuatro eran los grandes ancianos. Heisenberg tenía veinticinco años, Pauli veintisiete y Dirac veinticinco. Schrödinger, a la madura edad de treinta y ocho años, fue visto como alguien sospechosamente largo en el diente para aparecer en escena con nuevas ideas radicales como esta.

Noten el cambio aquí de las "ondas de materia" de de Broglie a la "función de onda" de Schrödinger. Aunque Schrödinger fue fuertemente influenciado por el trabajo de de Broglie, su concepto fue bastante más allá, y merece un nombre distinto. Lo más obvio es que el valor de una onda de materia en un punto cualquiera era un número real, mientras que las amplitudes descritas por las funciones de onda son números complejos, la suma de un número real y uno imaginario.

Más importante aún, la idea original era que cada tipo de partícula se asociara con una onda de materia. No es así como funciona la función de onda de Schrödinger; sólo tienes una función que depende de todas las partículas del universo. Es ese simple cambio el que lleva al fenómeno de entrelazamiento cuántico que altera el mundo.

Lo que hizo que las ideas de Schrödinger fueran un éxito instantáneo fue la ecuación que propuso, que rige cómo las funciones de las ondas cambian con el tiempo. Para un físico, una buena ecuación hace toda la diferencia. Eleva una idea bastante sólida ("las partículas tienen propiedades ondulatorias") a un marco riguroso e implacable. Implacable puede sonar como una mala cualidad en una persona, pero es justo lo que quieres en una teoría científica. Es la característica que te permite hacer predicciones precisas. Cuando decimos que los libros de texto cuánticos pasan mucho tiempo haciendo que los estudiantes resuelvan ecuaciones, es sobre todo la ecuación de Schrödinger la que tenemos en mente.

La ecuación de Schrödinger es lo que una versión cuántica del demonio de Laplace resolvería al predecir el futuro del universo. Y mientras que la forma original en la que Schrödinger escribió su ecuación estaba destinada a sistemas de partículas individuales, en realidad es una idea muy general que se aplica igualmente bien a los giros, campos, supercuerdas, o cualquier otro sistema que quieras describir usando la mecánica cuántica.

A diferencia de la mecánica matricial, que se expresaba en términos de conceptos matemáticos a los que la mayoría de los físicos de la época nunca habían estado expuestos, la ecuación de ondas de

Schrödinger no era tan diferente en su forma de las ecuaciones electromagnéticas de Maxwell que adornan las camisetas que llevan los estudiantes de física hasta hoy en día. Podrías visualizar una función de onda, o al menos podrías convencerte de que puedes hacerlo. La comunidad no estaba segura de qué hacer con Heisenberg, pero estaban listos para Schrödinger. El equipo de Copenhague, especialmente los jóvenes, Heisenberg y Pauli, no reaccionaron amablemente a las ideas en competencia de un viejo indistinto en Zurich. Pero pronto pensaron en términos de funciones de onda, como todos los demás.

La ecuación de Schrödinger involucra símbolos desconocidos, pero su mensaje básico no es difícil de entender. De Broglie había sugerido que el impulso de una onda sube cuando su longitud de onda baja. Schrödinger propuso algo similar, pero para la energía y el tiempo: la velocidad a la que la función de la onda cambia es proporcional a la cantidad de energía que tiene. Aquí está la célebre ecuación en su forma más general:

$$\frac{\partial \Psi}{\partial t} = \frac{1}{i\hbar} H\Psi$$

No necesitamos los detalles aquí, pero es bueno ver la forma real en que los físicos piensan en una ecuación como esta. Hay algunas matemáticas involucradas, pero en última instancia es sólo una traducción en símbolos de la idea que escribimos en palabras.

Ψ (la letra griega Psi) es la función de onda. El lado izquierdo es la velocidad a la que la función de onda cambia con el tiempo. En el lado derecho tenemos una constante de proporcionalidad que involucra la constante de Planck ħ, la unidad fundamental de la mecánica cuántica, y *i*, la raíz cuadrada de menos uno. La función de onda Ψ es actuada por algo llamado el *Hamiltoniano*, o *H*. Piense en el Hamiltoniano como un inquisidor que hace la siguiente pregunta: "¿Cuánta energía tienes?" El concepto fue inventado en 1833 por el matemático irlandés William Rowan Hamilton, como una forma de reformular las leyes de movimiento de un sistema clásico, mucho antes de que adquiriera un papel central en la mecánica cuántica.

Cuando los físicos empiezan a modelar diferentes sistemas físicos, lo primero que intentan hacer es elaborar una expresión matemática para el Hamiltoniano de ese sistema. La forma estándar de averiguar el Hamiltoniano de algo como una colección de partículas es empezar con las energías de las propias partículas, y luego añadir contribuciones adicionales que describan cómo las partículas interactúan entre sí. Tal vez se chocan entre sí como bolas de billar, o tal vez ejercen una interacción gravitatoria mutua. Cada una de estas posibilidades sugiere un tipo particular de Hamiltoniano. Y si conoces el Hamiltoniano, lo sabes todo; es una forma compacta de capturar toda la dinámica de un sistema físico.

Si una función de onda cuántica describe un sistema con algún valor definido de la energía, el Hamiltoniano simplemente iguala ese valor, y la ecuación de Schrödinger implica que el sistema sigue haciendo lo mismo, manteniendo una energía fija. Más a menudo, dado que las funciones de onda son superposiciones de diferentes posibilidades, el sistema será una combinación de múltiples energías. En ese caso el Hamiltoniano captura un poco de todas ellas. El resultado final es que la parte derecha de la ecuación de Schrödinger es una forma de caracterizar cuánta energía es transportada por cada una de las contribuciones a una función de onda en una superposición cuántica; los componentes de alta energía evolucionan rápidamente, los de baja energía lo hacen más lentamente.

Lo que realmente importa es que hay alguna ecuación determinista específica. Una vez que la tienes, el mundo es tu patio de recreo.

La mecánica ondulatoria causó un gran revuelo, y en poco tiempo Schrödinger, el físico inglés Paul Dirac y otros demostraron que era esencialmente equivalente a la mecánica matricial, dejándonos con una teoría unificada del mundo cuántico. Sin embargo, no todo era melocotón y crema. Los físicos se quedaron con la pregunta con la que todavía estamos luchando hoy en día: ¿Cuál *es* la función de la onda, en realidad? ¿Qué cosa física representa, si es que representa alguna?

En opinión de de Broglie, sus ondas de materia sirvieron para guiar las partículas, no para reemplazarlas completamente. (Más tarde desarrolló esta idea en la teoría de las ondas piloto, que sigue siendo un enfoque viable para los fundamentos cuánticos hoy en día, aunque no es popular entre los físicos en activo). Schrödinger, por el contrario, quería eliminar por completo las partículas fundamentales. Su esperanza original era que su ecuación describiera paquetes localizados de vibraciones, confinados a una región relativamente pequeña del espacio, de modo que cada paquete

pareciera una partícula para un observador macroscópico. Se podría pensar que la función de onda representa la densidad de la masa en el espacio.

Desgraciadamente, las aspiraciones de Schrödinger fueron deshechas por su propia ecuación. Si comenzamos con una función de onda que describe una sola partícula aproximadamente localizada en alguna región vacía del espacio, la ecuación de Schrödinger es clara en cuanto a lo que sucede a continuación: se extiende rápidamente por todo el lugar. Dejadas a su aire, las funciones de onda de Schrödinger no se parecen en nada a las de las partículas. *

Se dejó a Max Born, uno de los colaboradores de Heisenberg en la mecánica matricial, la última pieza que faltaba: deberíamos pensar en la función de onda como una forma de calcular la probabilidad de ver una partícula en una posición determinada cuando la buscamos. En particular, deberíamos tomar las partes reales e imaginarias de la amplitud de valor complejo, cuadrarlas individualmente y sumar los dos números. El resultado es la probabilidad de observar el resultado correspondiente. (La sugerencia de que es la amplitud al cuadrado, en lugar de la amplitud en sí misma, aparece en una nota al pie de página añadida en el último minuto al artículo de Born de 1926). Y después de observarlo, la función de onda se colapsa para ser localizada en el lugar donde vimos la partícula.

¿Sabes a quién no le gustó la interpretación de la probabilidad de la ecuación de Schrödinger? El mismo Schrödinger. Su objetivo, como el de Einstein, era proporcionar una base mecanicista definitiva para los fenómenos cuánticos, no sólo crear una herramienta que pudiera ser utilizada para calcular probabilidades. "No me gusta, y lamento haber tenido algo que ver con esto", se quejó más tarde. El punto del famoso experimento de pensamiento del Gato de Schrödinger, en el que la función de onda de un gato evoluciona (a través de la ecuación de Schrödinger) en una superposición de "vivo" y "muerto", no era hacer que la gente dijera, "Vaya, la mecánica cuántica es realmente misteriosa". Era para hacer que la gente dijera, "Vaya, esto no puede ser correcto". Pero hasta donde sabemos, lo es.

Mucha acción intelectual se concentró en las tres primeras décadas del siglo XX. En el curso del siglo XIX, los físicos habían elaborado un cuadro prometedor de la naturaleza de la materia y las fuerzas. La materia estaba hecha de partículas, y las fuerzas eran transportadas por campos, todo bajo el paraguas de la mecánica clásica. Pero la confrontación con los datos experimentales les obligó a pensar más allá de este paradigma. Para explicar la radiación de los objetos calientes, Planck sugirió que la luz se emitía en cantidades discretas de energía, y Einstein lo llevó más allá al sugerir que la luz realmente venía en forma de cuantos parecidos a partículas. Mientras tanto, el hecho de que los átomos son estables y la observación de cómo se emitía la luz de los gases inspiró a Bohr a sugerir que los electrones sólo podían moverse a lo largo de ciertas órbitas permitidas, con saltos ocasionales entre ellas. Heisenberg, Born y Jordan elaboraron esta historia de saltos probabilísticos en una teoría completa, la mecánica de matrices. Desde otro ángulo, de Broglie señaló que si pensamos que las partículas de materia como los electrones son en realidad ondas, podemos derivar las órbitas cuantizadas de Bohr en lugar de postularlas. Schrödinger desarrolló esta sugerencia en una teoría cuántica propia, y finalmente se demostró que la mecánica ondulatoria y la mecánica matricial eran formas equivalentes de decir lo mismo. A pesar de las esperanzas iniciales de que la mecánica ondulatoria pudiera explicar la aparente necesidad de las probabilidades como parte fundamental de la teoría, Born demostró que la forma correcta de pensar sobre la función de onda de Schrödinger era como algo que se cuadra para obtener la probabilidad de un resultado de medición.

Uf. Es un gran viaje, realizado en un período de tiempo notablemente corto, desde la observación de Planck en 1900 hasta la Conferencia de Solvay en 1927, cuando la nueva mecánica cuántica se desarrolló de una vez por todas. Es un gran mérito de los físicos de principios del siglo XX que estuvieran dispuestos a hacer frente a las exigencias de los datos experimentales y, al hacerlo, a cambiar completamente la fantástica visión newtoniana del mundo clásico.

Sin embargo, tuvieron menos éxito al enfrentarse a las implicaciones de lo que habían hecho.

---

* Molesto, el electrón se acelera precisamente en la dirección opuesta a la del campo eléctrico, porque por convención humana hemos decidido llamar a la carga del electrón "negativa" y a la del protón "positiva". Por eso podemos culpar a Benjamin Franklin en el siglo XVIII. Él no sabía de electrones y protones, pero se dio cuenta de que había un concepto unificado llamado "carga eléctrica". Cuando fue a etiquetar arbitrariamente qué sustancias estaban cargadas positivamente y cuáles negativamente, tuvo

que elegir algo, y la etiqueta que eligió para la carga positiva corresponde a lo que ahora llamaríamos "tener menos electrones de los que debería". Que así sea.

* He enfatizado que sólo hay una función de onda, la función de onda del universo, pero el lector alerta notará que a menudo hablo de "la función de onda de una partícula". Esta última construcción está perfectamente bien si-y sólo si-la partícula está desenredada del resto del universo. Afortunadamente, eso es a menudo el caso, pero en general tenemos que mantener el ingenio sobre nosotros.

4

Lo que no puede ser conocido, porque no existe

Incertidumbre y complementariedad

Un oficial de policía detiene a Werner Heisenberg por exceso de velocidad. "¿Sabes lo rápido que ibas?" pregunta el policía. "No", responde Heisenberg, "¡pero sé exactamente dónde estoy!"

Creo que todos estamos de acuerdo en que los chistes de física son los más divertidos que hay. Son menos buenos para transmitir la física con precisión. Esta castaña en particular se basa en la familiaridad con el famoso principio de incertidumbre de Heisenberg, que a menudo se explica diciendo que no podemos conocer simultáneamente la posición y la velocidad de ningún objeto. Pero la realidad es más profunda que eso.

No es que no podamos conocer la posición y el momento, es que ni siquiera existen al mismo tiempo. Sólo bajo circunstancias extremadamente especiales se puede decir que un objeto tiene una ubicación -cuando su función de onda está totalmente concentrada en un punto del espacio, y cero en cualquier otro lugar- y de manera similar para la velocidad. Y cuando uno de los dos está definido con precisión, el otro podría ser literalmente cualquier cosa, si lo medimos. Más a menudo, la función de onda incluye una extensión de posibilidades para ambas cantidades, por lo que ninguna tiene un valor definido.

En los años 20, todo esto estaba menos claro. Todavía era natural pensar que la naturaleza probabilística de la mecánica cuántica simplemente indicaba que era una teoría incompleta, y que había una imagen más determinista, de sonido clásico, esperando a ser desarrollada. En otras palabras, las funciones de onda podrían ser una forma de caracterizar nuestra ignorancia de lo que realmente estaba sucediendo, en lugar de ser la verdad total sobre lo que está sucediendo, como estamos defendiendo aquí. Una de las primeras cosas que la gente hizo cuando aprendió sobre el principio de incertidumbre fue tratar de encontrar lagunas en él. Fracasaron, pero al hacerlo aprendimos mucho sobre cómo la realidad cuántica es fundamentalmente diferente del mundo clásico al que estábamos acostumbrados.

La ausencia de cantidades definidas en el corazón de la realidad que se correspondan más o menos directamente con lo que podemos observar eventualmente es uno de los rasgos profundos de la mecánica cuántica que puede ser difícil de aceptar en el primer encuentro. Hay cantidades que no sólo son desconocidas sino que ni siquiera existen, aunque aparentemente podamos medirlas.

La mecánica cuántica nos obliga a enfrentarnos a este gran abismo entre lo que vemos y lo que realmente es. En este capítulo veremos cómo ese abismo se manifiesta en el principio de incertidumbre, y en el siguiente capítulo lo veremos de nuevo con más fuerza en el fenómeno del enredo.

El principio de incertidumbre debe su existencia al hecho de que la relación entre la posición y el momento (masa por velocidad) es fundamentalmente diferente en la mecánica cuántica de lo que era en la mecánica clásica. Clásicamente, podemos imaginarnos midiendo el momento de una partícula rastreando su posición en el tiempo, y viendo cuán rápido se mueve. Pero si sólo tenemos acceso a un único momento, la posición y el momento son completamente independientes el uno del otro. Si te digo que una partícula tiene una cierta posición en un instante, y no te digo nada más, no tienes ni idea de cuál es su velocidad, y viceversa.

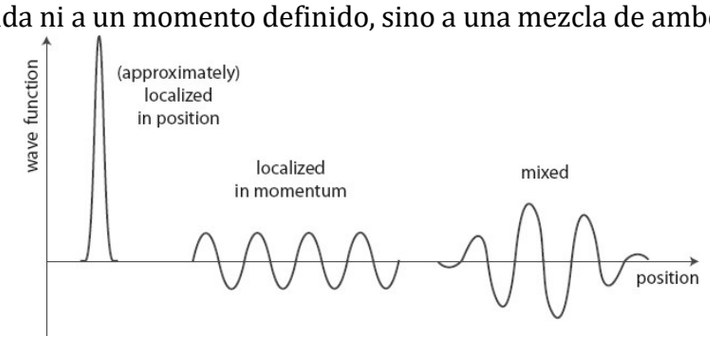
Los físicos se refieren a los diferentes números que usamos para especificar algo como los "grados de libertad" de ese sistema. En la mecánica newtoniana, para decirme el estado completo de un grupo de partículas, tienes que decirme la posición y el momento de cada una de ellas, así que los grados de libertad son las posiciones y el momento. La aceleración no es un grado de libertad, ya que se puede calcular una vez que conocemos las fuerzas que actúan en el sistema. La esencia de un grado de libertad es que no depende de nada más.

Cuando cambiamos a la mecánica cuántica y empezamos a pensar en las funciones de onda de Schrödinger, las cosas se vuelven un poco diferentes. Para hacer que una onda funcione para una sola partícula, piense en cada lugar donde la partícula podría ser encontrada, si la observamos. Luego, a

cada lugar asigne una amplitud, un número complejo con la propiedad de que el cuadrado de cada número es la probabilidad de encontrar la partícula allí. Existe la restricción de que los cuadrados de todos estos números suman precisamente uno, ya que la probabilidad total de que la partícula se encuentre en algún lugar debe ser igual a uno. (A veces hablamos de probabilidades en términos de porcentajes, que numéricamente son 100 veces la probabilidad real; una probabilidad del 20 por ciento es lo mismo que una probabilidad del 0,2).

Fíjese que no mencionamos "velocidad" o "momento" ahí. Eso es porque no tenemos que especificar por separado el momento en la mecánica cuántica, como hicimos en la mecánica clásica. La probabilidad de medir cualquier velocidad particular está completamente determinada por la función de onda para todas las posiciones posibles. La velocidad no es un grado de libertad separado, independiente de la posición. La razón básica es que la función de onda es, ya sabes, una onda. A diferencia de una partícula clásica, no tenemos una sola posición y un solo momento, tenemos una función de todas las posiciones posibles, y esa función típicamente oscila hacia arriba y hacia abajo. La velocidad de esas oscilaciones determina lo que probablemente veamos si tuviéramos que medir la velocidad o el momento.

Considere una simple onda sinusoidal, que oscila arriba y abajo en un patrón regular a través del espacio. Conecta esa función de onda en la ecuación de Schrödinger y pregunta cómo evolucionará. Encontramos que una onda sinusoidal tiene un momento definido, con longitudes de onda más cortas que corresponden a una velocidad más rápida. Pero una onda sinusoidal no tiene una posición definida; por el contrario, se extiende por todas partes. Y una forma más típica, que no está localizada en un punto ni se extiende en una onda sinusoidal perfecta de longitud de onda fija, no corresponderá ni a una posición definida ni a un momento definido, sino a una mezcla de ambos.



Vemos el dilema básico. Si intentamos localizar una función de onda en el espacio, su impulso se hace cada vez más disperso, y si intentamos limitarlo a una longitud de onda fija (y por lo tanto al impulso) se hace más disperso en su posición. Ese es el principio de incertidumbre. No es que no podamos *conocer* ambas cantidades al mismo tiempo; es sólo un hecho sobre el funcionamiento de las funciones de onda que si la posición se concentra cerca de algún lugar, el momento es completamente indeterminado, y viceversa. Las propiedades clásicas anticuadas llamadas *posición* y *momento* no son cantidades con valores reales, son posibles resultados de medición.

La gente a veces se refiere al principio de incertidumbre en contextos cotidianos, fuera del lenguaje lleno de ecuaciones de los textos de física. Así que es importante enfatizar lo que el principio *no* dice. No es una afirmación de que "todo es incierto". Cualquier posición o momento podría ser cierto en un estado cuántico apropiado; simplemente no pueden ser seguros al mismo tiempo.

Y el principio de incertidumbre no dice que necesariamente perturbamos un sistema cuando lo medimos. Si una partícula tiene un impulso definido, podemos seguir adelante y medirlo sin cambiarlo en absoluto. El punto es que no hay estados para los cuales la posición y el momento sean simultáneamente definitivos. El principio de incertidumbre es una declaración sobre la naturaleza de los estados cuánticos y su relación con las cantidades observables, no una declaración sobre el acto físico de la medición.

Por último, el principio no es una declaración sobre las limitaciones de nuestro conocimiento del sistema. Podemos conocer el estado cuántico con exactitud, y eso es todo lo que hay que saber sobre él; todavía no podemos predecir los resultados de todas las posibles observaciones futuras con perfecta certeza. La idea de que "hay algo que no sabemos", dada una cierta función de onda, es una reliquia anticuada de nuestra insistencia intuitiva de que lo que observamos es lo que realmente existe. La mecánica cuántica nos enseña otra cosa.

A veces se oye la idea, provocada por el principio de incertidumbre, de que la mecánica cuántica viola la propia *lógica*. Eso es una tontería. La lógica deduce teoremas de los axiomas, y los teoremas resultantes son simplemente verdaderos. Los axiomas pueden o no aplicarse a una situación física determinada. El teorema de Pitágoras -el cuadrado de la hipotenusa de un triángulo rectángulo es igual a la suma de los cuadrados de los otros dos lados- es correcto como una deducción formal de los axiomas de la geometría euclidiana, aunque esos axiomas no se sostienen si hablamos de superficies curvas en lugar de una mesa plana.

La idea de que la mecánica cuántica viola la lógica vive en el mismo vecindario de la idea de que los átomos son en su mayoría espacio vacío (un mal vecindario). Ambas nociones surgen de una profunda convicción de que, a pesar de todo lo que hemos aprendido, las partículas son realmente puntos con cierta posición e impulso, en lugar de ser funciones de onda que se dispersan.

Considere una partícula en una caja, donde hemos dibujado una línea que divide la caja en lados izquierdo y derecho. Tiene una función de onda que se extiende por toda la caja. Dejemos que la proposición P sea "la partícula está en el lado izquierdo de la caja", y la proposición Q sea "la partícula está en el lado derecho de la caja". Podríamos estar tentados a decir que ambas proposiciones son falsas, ya que la función de onda se extiende por ambos lados de la caja. Pero la proposición "P o Q" tiene que ser verdadera, ya que la partícula está en la caja. En la lógica clásica, no podemos hacer que tanto P como Q sean falsas, sino que "P o Q" sean verdaderas. Así que algo raro está pasando.

Lo que es sospechoso no es ni la lógica ni la mecánica cuántica, sino nuestra indiferencia casual por la naturaleza de los estados cuánticos al asignar valores de verdad a las declaraciones P y Q. Estas declaraciones no son ni verdaderas ni falsas; sólo están mal definidas. No existe tal cosa como "el lado de la caja en el que está la partícula". Si la función de onda se concentrara completamente en un lado de la caja y desapareciera exactamente en el otro, podríamos salirnos con la suya asignando valores de verdad a P y Q; pero en ese caso uno sería verdadero y el otro falso, y la lógica clásica estaría bien.

A pesar de que la lógica clásica es perfectamente válida siempre que se aplica correctamente, la mecánica cuántica ha inspirado enfoques más generales conocidos como *lógica cuántica*, de los que fueron pioneros John von Neumann y su colaborador Garrett Birkhoff. Partiendo de axiomas lógicos ligeramente diferentes de los estándar, podemos derivar un conjunto de reglas obedecidas por las probabilidades implícitas en la regla de Born en la mecánica cuántica. La lógica cuántica en este sentido es tanto interesante como útil, pero su existencia no invalida la corrección de la lógica ordinaria en circunstancias apropiadas.

Niels Bohr, en un intento de capturar lo que hace que la teoría cuántica sea tan única, propuso el concepto de *complementariedad*. La idea es que puede haber más de dos formas de ver un sistema cuántico, cada una de ellas igualmente válida, pero con la propiedad de que no se pueden emplear simultáneamente. Podemos describir la función de onda de una partícula en términos de posición o de momento, pero no ambos al mismo tiempo. De forma similar, podemos pensar en los electrones como si exhibieran propiedades similares a las de las partículas o a las de las ondas, pero no al mismo tiempo.

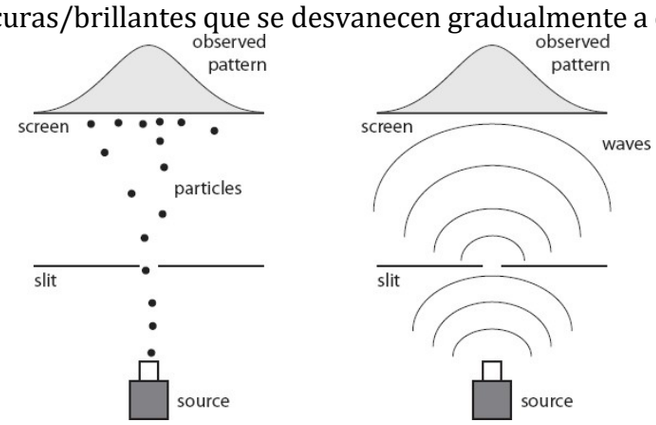
En ningún lugar esta característica se hace más evidente que en el famoso experimento de la doble rendija. Este experimento no se realizó realmente hasta los años 70, mucho después de que se propusiera. No fue uno de esos sorprendentes resultados experimentales que los teóricos tuvieron que inventar una nueva forma de pensar para poder entenderlo, sino más bien un experimento de pensamiento (sugerido en su forma original por Einstein durante sus debates con Bohr, y más tarde popularizado por Richard Feynman en sus conferencias a los estudiantes de Caltech) destinado a mostrar las dramáticas implicaciones de la teoría cuántica.

La idea del experimento es establecer la distinción entre partículas y ondas. Comenzamos con una fuente de partículas clásicas (tal vez una pistola de perdigones que tiende a pulverizar en direcciones algo impredecibles), las disparamos a través de una sola rendija delgada, y luego las detectamos en una pantalla al otro lado de la rendija. La mayoría de las partículas pasarán a través de ella, con quizás muy ligeras desviaciones si chocan contra los lados de la ranura. Así que lo que vemos en el detector es un patrón de puntos individuales en los que detectamos las partículas, dispuestos más o menos en un patrón similar a una rendija.

También podríamos hacer lo mismo con las olas, por ejemplo, colocando la rendija en una bañera de agua y creando olas que la atraviesen. Cuando las ondas pasan a través de ella, se propagan en un patrón semicircular antes de llegar finalmente a la pantalla. Por supuesto, no observamos puntos similares a las partículas cuando la onda de agua golpea la pantalla, pero imaginemos que tenemos

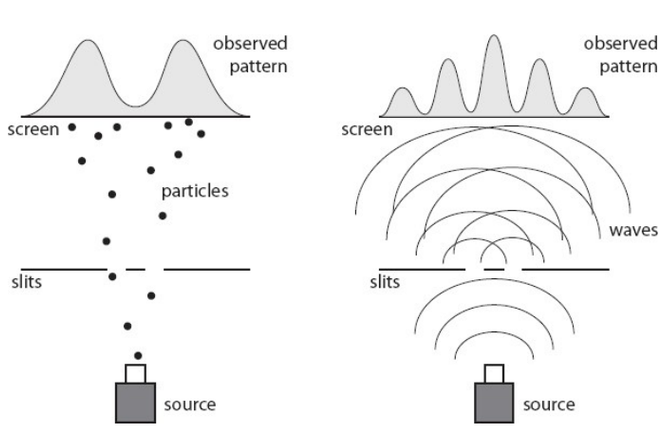
una pantalla especial que se ilumina con un brillo que depende de la amplitud que las ondas alcanzan en un punto determinado. Serán más brillantes en el punto de la pantalla que está más cerca de la rendija, y gradualmente se desvanecerán a medida que nos alejemos.

Ahora hagamos lo mismo, pero con dos rendijas en el camino en lugar de sólo una. El caso de las partículas no es tan diferente; mientras nuestra fuente de partículas sea lo suficientemente aleatoria como para que las partículas pasen por ambas rendijas, lo que veremos en el otro lado son dos líneas de puntos, una por cada rendija (o una línea gruesa, si las rendijas están lo suficientemente cerca). Pero el caso de la onda se altera de una manera interesante. Las ondas pueden oscilar tanto hacia abajo como hacia arriba, y dos ondas que oscilen en direcciones opuestas se cancelarán mutuamente, un fenómeno conocido como *interferencia*. Así que las ondas pasan por ambas rendijas a la vez, emanando hacia afuera en semicírculos, pero luego establecen un patrón de interferencia en el otro lado. Como resultado, si observamos la amplitud de la onda resultante en la pantalla final, no vemos simplemente dos líneas brillantes, sino que habrá una línea brillante en el centro (la más cercana a ambas rendijas), con regiones alternas oscuras/brillantes que se desvanecen gradualmente a cada lado.



Hasta ahora, ese es el mundo clásico que conocemos y amamos, donde las partículas y las ondas son cosas diferentes y todos pueden distinguirlas fácilmente. Ahora vamos a reemplazar nuestra pistola de pellets o máquina de ondas con una fuente de electrones, en toda su gloria mecánica cuántica. Hay varios giros en esta configuración, cada uno con consecuencias provocativas.

Primero considera una sola rendija. En este caso los electrones se comportan como si fueran partículas clásicas. Pasan a través de la rendija, luego son detectados por la pantalla del otro lado, cada electrón deja una única marca parecida a una partícula. Si dejamos pasar numerosos electrones, sus marcas se dispersan alrededor de una línea central en la imagen de la rendija que atravesaron. Nada gracioso todavía.

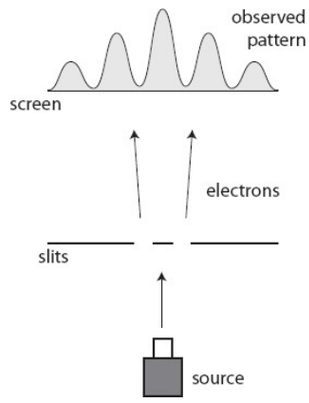


Ahora vamos a introducir dos rendijas. (Las rendijas tienen que estar muy juntas para que esto funcione, que es una de las razones por las que el experimento tardó tanto en llevarse a cabo). Una vez más, los electrones pasan a través de las rendijas y dejan marcas individuales en la pantalla del otro lado. Sin embargo, sus marcas *no se agrupan* en dos líneas, como lo hacían los clásicos perdigones. Más bien forman una serie de líneas: una de alta densidad en el centro, rodeada de líneas paralelas con menos marcas gradualmente, cada una separada por regiones oscuras con casi ninguna marca.

En otras palabras, los electrones que pasan por dos rendijas dejan lo que es inconfundiblemente un patrón de interferencia, como lo hacen las ondas, a pesar de que golpean la pantalla con marcas individuales al igual que las partículas. Este fenómeno ha lanzado mil discusiones poco útiles sobre si los electrones son "realmente" partículas u ondas, o si son a veces como partículas y otras veces como

ondas. De una forma u otra, es indiscutible que algo pasó por ambas rendijas mientras los electrones viajaban hacia la pantalla.

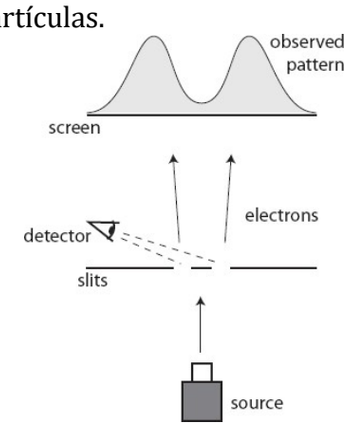
En este momento esto no es una sorpresa para nosotros. Los electrones que pasan por las rendijas se describen por una función de onda, que al igual que nuestra onda clásica pasará por ambas rendijas y oscilará hacia arriba y hacia abajo, y por lo tanto tiene sentido que veamos patrones de interferencia. Luego, cuando llegan a la pantalla se observan, y es en ese punto en el que nos aparecen como partículas.



Introduzcamos una arruga adicional. Imaginemos que colocamos pequeños detectores en cada rendija, para poder saber si un electrón pasa por ella. Eso resolverá esta loca idea de que un electrón puede viajar a través de dos rendijas de una vez por todas.

Deberías ser capaz de averiguar lo que vemos. Los detectores no miden la mitad de un electrón que pasa por cada una de las dos rendijas; miden un electrón completo que pasa por una, y nada por la otra, cada vez. Eso es porque el detector actúa como un dispositivo de medición, y cuando medimos los electrones vemos partículas.

Pero esa no es la única consecuencia de mirar al electrón cuando pasa por las rendijas. En la pantalla, al otro lado de las rendijas, el patrón de interferencia desaparece, y volvemos a ver dos bandas de marcas hechas por los electrones detectados, una por cada rendija. Con los detectores haciendo su trabajo, la función de la onda colapsa a medida que el electrón pasa por las rendijas, por lo que no vemos interferencias de una onda que pasa por ambas rendijas a la vez. Cuando los miramos, los electrones se comportan como partículas.



El experimento de la doble rendija hace difícil aferrarse a la creencia de que el electrón es sólo un único punto clásico, y la función de onda simplemente representa nuestra ignorancia sobre dónde está ese punto. La ignorancia no causa patrones de interferencia. Hay algo real en la función de onda.

Las funciones de onda pueden ser reales, pero son innegablemente abstractas, y una vez que empezamos a considerar más de una partícula a la vez se vuelven difíciles de visualizar. A medida que avancemos con ejemplos cada vez más sutiles de fenómenos cuánticos en acción, será muy útil tener un ejemplo simple y fácilmente comprensible al que podamos referirnos una y otra vez. El *giro* de una partícula, un grado de libertad además de su posición o momento, es justo lo que estamos buscando. Tenemos que pensar un poco en lo que significa el giro dentro de la mecánica cuántica, pero una vez que lo hagamos, hará nuestras vidas mucho más fáciles.

La noción de giro en sí misma no es difícil de entender: es sólo la rotación alrededor de un eje, como lo hace la Tierra todos los días o como lo hace un bailarín de ballet en puntas de pie. Pero al igual que las energías de un electrón que orbita alrededor de un núcleo atómico, en la mecánica cuántica sólo hay ciertos resultados discretos que podemos obtener cuando medimos el spin de una partícula.

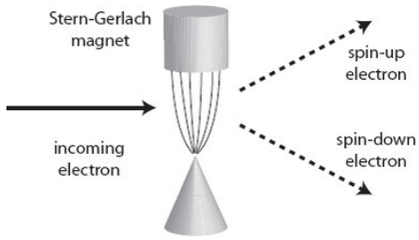
Para un electrón, por ejemplo, hay dos posibles resultados de medición para el espín. Primero escoge un eje con respecto al cual medimos el espín. Siempre encontramos que el electrón está girando en el sentido de las agujas del reloj o en sentido contrario a las agujas del reloj cuando miramos a lo

largo de ese eje, y siempre a la misma velocidad. Estos se denominan convencionalmente "spin-up" y "spin-down". Piense en la "regla de la mano derecha": si envuelve los dedos de su mano derecha en la dirección de la rotación, su pulgar estará apuntando a lo largo del eje apropiado arriba/abajo.

Un electrón giratorio es un imán diminuto, con polos magnéticos norte y sur, muy parecido a la Tierra; el eje de giro apunta hacia el polo norte. Una forma de medir el spin de un electrón en particular es dispararlo a través de un campo magnético, que desviará el electrón un poco dependiendo de cómo esté orientado su spin. (Como tecnicismo, el campo magnético tiene que ser enfocado de la manera correcta, extendido por un lado, apretado por el otro, para que esto funcione).

Si le dijera que el electrón tiene un cierto giro total, podría hacer la siguiente predicción para tal experimento: el electrón se desviaría hacia arriba si su eje de giro estuviera alineado con el campo externo, se desviaría hacia abajo si su giro estuviera alineado en la dirección opuesta, y se desviaría en algún ángulo intermedio si su giro estuviera en algún punto intermedio. Pero eso no es lo que vemos.

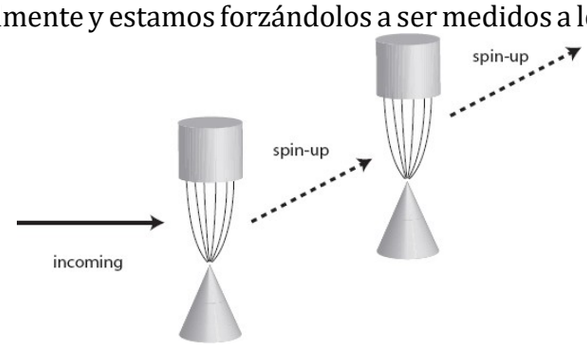
Este experimento fue realizado por primera vez en 1922 por los físicos alemanes Otto Stern (un asistente de Max Born) y Walter Gerlach, antes de que la idea del espín fuera explícitamente explicada. Lo que vieron fue notable. Los electrones son efectivamente desviados al pasar a través del campo magnético, pero o suben, o bajan; nada en el medio. Si giramos el campo magnético, los electrones siguen desviados en la dirección del campo que atraviesan, ya sea a lo largo o en contra de él, pero no hay valores intermedios. El espín medido, como la energía de un electrón que orbita alrededor de un núcleo atómico, parece estar cuantificado.



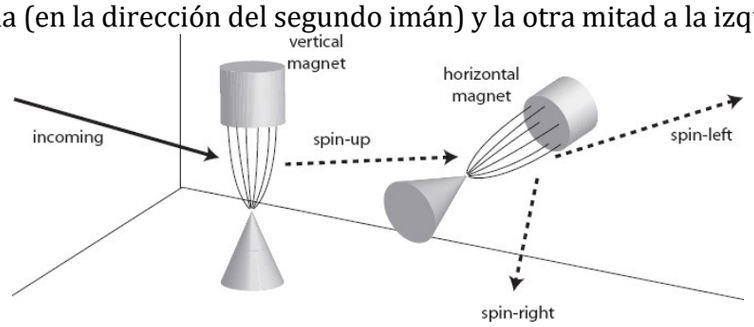
Eso parece sorprendente. Aunque nos hemos acostumbrado a la idea de que la energía de un electrón que orbita alrededor de un núcleo sólo viene en ciertos valores cuantificados, al menos esa energía parece una propiedad objetiva del electrón. Pero esta cosa que llamamos "espín" del electrón parece darnos diferentes respuestas dependiendo de cómo lo midamos. No importa en qué dirección particular midamos el espín, sólo podemos obtener dos resultados posibles.

Para asegurarnos de que no hemos perdido la cabeza, seamos inteligentes y pasemos el electrón por dos imanes seguidos. Recuerde que las reglas de la mecánica cuántica de los libros de texto nos dicen que si obtenemos un cierto resultado de medición, y luego medimos el mismo sistema inmediatamente de nuevo, siempre obtendremos la misma respuesta. Y de hecho eso es lo que sucede; si un electrón es desviado hacia arriba por un imán (y por lo tanto es un spin-up), siempre será desviado hacia arriba por un imán siguiente orientado de la misma manera.

¿Y si giramos uno de los imanes en 90 grados? Así que dividimos un haz inicial de electrones en spin-up y spin-down según la medida de un imán orientado verticalmente, luego tomamos los electrones spin-up y los pasamos a través de un imán orientado horizontalmente. ¿Qué sucede entonces? ¿Aguantan la respiración y se niegan a pasar a través de ellos, porque son electrones de rotación orientados verticalmente y estamos forzándolos a ser medidos a lo largo de un eje horizontal?



No. En su lugar, el segundo imán divide los electrones de rotación en dos haces. La mitad de ellos se desvían a la derecha (en la dirección del segundo imán) y la otra mitad a la izquierda.



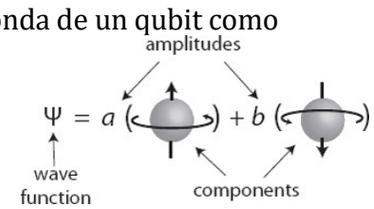
Una locura. Nuestra intuición clásica nos hace pensar que hay algo llamado "el eje alrededor del cual el electrón está girando", y tiene sentido (tal vez) que el giro alrededor de *ese eje esté cuantizado*. Pero los experimentos muestran que el eje alrededor del cual el espín está cuantizado no está predeterminado por la propia partícula; puedes elegir cualquier eje que desees girando tu imán apropiadamente, y el espín estará cuantizado con respecto a ese eje.

Con lo que nos encontramos es otra manifestación del principio de incertidumbre. La lección que aprendimos fue que la "posición" y el "momento" no son propiedades que tenga un electrón; son sólo cosas que podemos medir sobre él. En particular, ninguna partícula puede tener un valor definido de ambos simultáneamente. Una vez que especificamos la función de onda exacta para la posición, la probabilidad de observar cualquier momento particular es totalmente fija, y viceversa.

Lo mismo ocurre con el "giro vertical" y el "giro horizontal". * Estas no son propiedades separadas que un electrón puede tener; son sólo diferentes cantidades que podemos medir. Si expresamos el estado cuántico en términos de espín vertical, la probabilidad de observar el espín horizontal izquierdo o derecho es totalmente fija. Los resultados de las mediciones que podemos obtener están determinados por el estado cuántico subyacente, que puede expresarse de maneras diferentes pero equivalentes. El principio de incertidumbre expresa el hecho de que hay diferentes mediciones incompatibles que podemos hacer en cualquier estado cuántico particular.

Los sistemas con dos posibles resultados de medición son tan comunes y útiles en la mecánica cuántica que se les da un lindo nombre: *qubits*. La idea es que un "bit" clásico tiene sólo dos valores posibles, digamos, 0 y 1. Un qubit (bit cuántico) es un sistema que tiene dos posibles resultados de medición, digamos, spin-up y spin-down a lo largo de algún eje especificado. El estado de un qubit genérico es una superposición de ambas posibilidades, cada una de ellas ponderada por un número complejo, la amplitud de cada alternativa. Los ordenadores cuánticos manipulan los qubits de la misma manera que los ordenadores ordinarios manipulan los bits clásicos.

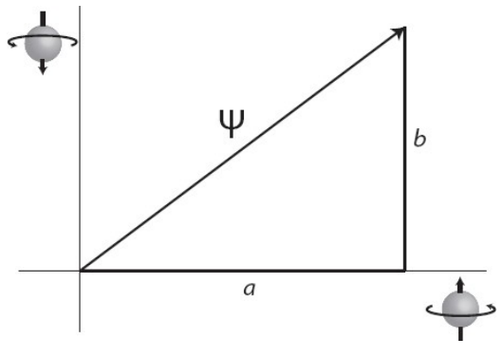
Podemos escribir la función de onda de un qubit como



Los símbolos *a* y *b* son números complejos, que representan las amplitudes para el spin-up y el spin-down, respectivamente. Las piezas de la función de onda que representan los diferentes resultados de medición posibles, en este caso spin-up/down, son los "componentes". En este estado, la probabilidad de observar la partícula que va a ser spin-up sería |a|2, y la probabilidad de spin-down sería |b|2. Si, por ejemplo, *a* y *b* fueran ambas iguales a la raíz cuadrada de 1/2, la probabilidad de observar spin-up o spin-down sería 1/2.

Los Qubits pueden ayudarnos a entender una característica crucial de las funciones de onda: son como la hipotenusa de un triángulo rectángulo, para el cual los lados más cortos son las amplitudes para cada posible resultado de la medición. En otras palabras, la función de onda es como un vector, *una flecha* con una longitud y una dirección.

El vector del que hablamos no apunta en una dirección del espacio físico real, como "arriba" o "norte". Más bien, apunta a un espacio definido por todos los posibles resultados de las mediciones. Para un solo qubit de giro, eso es o bien un giro hacia arriba o hacia abajo (una vez que elegimos algún eje a lo largo del cual medir). Cuando decimos "el qubit está en una superposición de spin-up y spin-down", lo que realmente queremos decir es "el vector que representa el estado cuántico tiene algún componente en la dirección spin-up, y otro componente en la dirección spin-down".



Es natural pensar que los giros hacia arriba y hacia abajo apuntan en direcciones opuestas. Quiero decir, sólo mira las flechas. Pero como estados cuánticos, son perpendiculares entre sí: un qubit que es completamente spin-up no tiene ningún componente de spin-down, y viceversa. Incluso la función de onda para la posición de una partícula es un vector, aunque normalmente la visualizamos como una función suave en todo el espacio. El truco está en pensar que cada punto del espacio define un componente diferente, y la función de onda es una superposición de todos ellos. Hay un número infinito de tales vectores, por lo que el espacio de todos los posibles estados cuánticos, llamado espacio de *Hilbert*, es infinitamente dimensional para la posición de una sola partícula. Por eso los qubits son mucho más fáciles de pensar. Las dos dimensiones son más fáciles de visualizar que las dimensiones infinitas.

Cuando sólo hay dos componentes en nuestro estado cuántico, en lugar de infinitamente muchos, puede ser difícil pensar en el estado como una "función de onda". No es muy ondulado, y no parece una función suave del espacio. La forma correcta de pensar en ello es en realidad al revés. El estado cuántico no es una función del espacio ordinario, es una función del abstracto "espacio de los resultados de las mediciones", que para un qubit sólo incluye dos posibilidades. Cuando lo que observamos es la ubicación de una sola partícula, el estado cuántico asigna una amplitud a cada posible ubicación, que se parece a una onda en el espacio ordinario. Sin embargo, ese es el caso inusual; la función de onda es algo más abstracto, y cuando más de una partícula está involucrada, se hace difícil de visualizar. Pero estamos atascados con la terminología de la "función de onda". Los Qubits son geniales porque al menos la función de onda tiene sólo dos componentes.

Esto puede parecer un desvío matemático innecesario, pero hay beneficios inmediatos al pensar en las funciones de onda como vectores. Uno de ellos es la explicación de la regla de Born, que dice que la probabilidad de cualquier resultado de medición particular viene dada por su amplitud al cuadrado. Nos adentraremos en los detalles más tarde, pero es fácil ver por qué la idea tiene sentido. Como vector, la función de onda tiene una longitud. Se podría esperar que la longitud se encogiera o creciera con el tiempo, pero no es así; de acuerdo con la ecuación de Schrödinger, la función de onda sólo cambia su "dirección" mientras mantiene una longitud constante. Y podemos calcular esa longitud usando el teorema de Pitágoras de la geometría de la escuela secundaria.

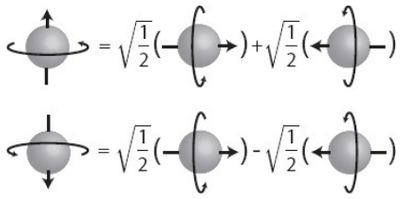
El valor numérico de la longitud del vector es irrelevante; sólo podemos elegirlo como un número conveniente, sabiendo que permanecerá constante. Elijamos que sea uno: cada función de onda es un vector de longitud uno. El propio vector es como la hipotenusa de un triángulo rectángulo, con los componentes formando los lados más cortos. Así que a partir del teorema de Pitágoras, tenemos una relación simple: los cuadrados de las amplitudes suman la unidad, $|a|2 + |b|2 = 1$.

Ese es el simple hecho geométrico que subyace a la regla de Born para las probabilidades cuánticas. Las amplitudes en sí mismas no suman uno, pero sus cuadrados sí. Eso es exactamente como una importante característica de la probabilidad: la suma de probabilidades para diferentes resultados debe ser igual a uno. (Algo tiene que suceder, y la probabilidad total de todas las cosas exclusivas se suma a la unidad). Otra regla es que las probabilidades deben ser números no negativos. Una vez más,

las amplitudes al cuadrado encajan: las amplitudes pueden ser negativas (o complejas), pero sus cuadrados son números reales no negativos.

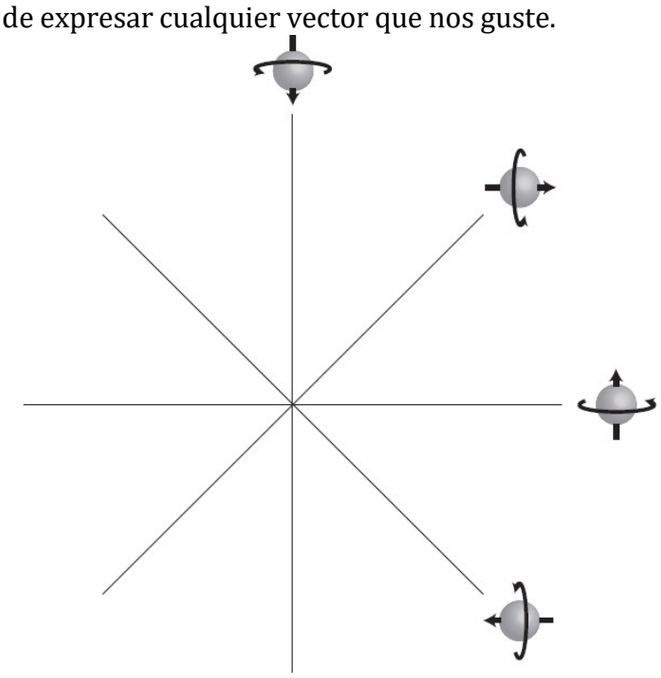
Así que incluso antes de pensarlo demasiado, podemos decir que las "amplitudes al cuadrado" tienen las propiedades correctas para ser las probabilidades de los resultados: son un conjunto de números no negativos que siempre suman uno, porque esa es la longitud de la función de onda. Esto está en el corazón de todo el asunto: la regla de Born es esencialmente el teorema de Pitágoras, aplicado a las amplitudes de las diferentes ramas. Por eso son las amplitudes al cuadrado, no las amplitudes en sí mismas o la raíz cuadrada de las amplitudes o algo loco como eso.

La imagen vectorial también explica el principio de incertidumbre de una manera elegante. Recuerde que los electrones de rotación se dividen al 50% en electrones de rotación derecha e izquierda cuando pasan a través de un imán horizontal posterior. Esto sugiere que un electrón en estado de spin-up equivale a una superposición de los estados de spin-derecha y spin-izquierda, y de la misma manera para el spin-abajo.



Así que la idea de ser giro-izquierda o giro-derecha no es independiente de ser giro-arriba o giro-abajo; cualquier posibilidad puede ser pensada como una superposición de las otras. Decimos que spin-up y spin-down juntos forman una *base* para el estado de un qubit, cualquier estado cuántico puede ser escrito como una superposición de esas dos posibilidades. Pero spin-izquierda y spin-derecha forman otra base, distinta pero igualmente buena. Escribirlo de una forma fija completamente la otra forma.

Piense en esto en términos de vectores. Si dibujamos un plano bidimensional con el spin-up como eje horizontal y el spin-down como eje vertical, a partir de las relaciones anteriores vemos que el spin-derecha y el punto de spin-izquierda están a 45 grados con respecto a ellos. Dada cualquier función de onda, podríamos expresarla en la base de arriba/abajo, pero también podríamos expresarla en la base de derecha/izquierda. Un conjunto de ejes está girado con respecto al otro, pero ambos son formas perfectamente legítimas de expresar cualquier vector que nos guste.



Ahora podemos ver de dónde viene el principio de incertidumbre. Para un solo giro, el principio de incertidumbre dice que el estado no puede tener un valor definido para el giro a lo largo de los ejes originales (arriba/abajo) y los ejes girados (derecha/izquierda) al mismo tiempo. Esto queda claro en la imagen: si el estado es puramente de espín, es automáticamente una combinación de espín-izquierda y espín-derecha, y viceversa.

Al igual que no hay estados cuánticos que se localizan simultáneamente en posición y momento, tampoco hay estados que se localizan simultáneamente en giro vertical y giro horizontal. El principio

de incertidumbre refleja la relación entre lo que realmente existe (estados cuánticos) y lo que podemos medir (un observable a la vez).

---

* Y para la tercera dirección perpendicular, que podríamos llamar "giro hacia adelante", aunque no la hemos medido.

5

Enredado en el azul

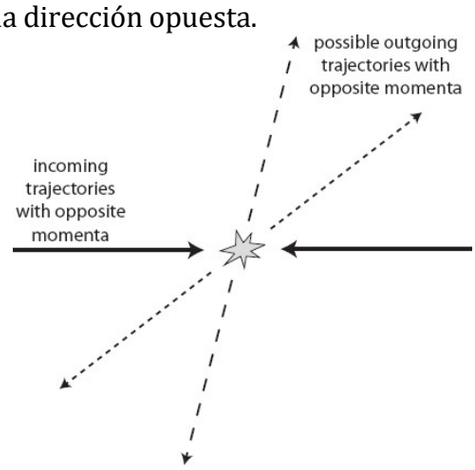
Funciones de onda de muchas partes

Las discusiones populares de los debates de Einstein-Bohr a menudo dan la impresión de que Einstein no pudo manejar bien el principio de la incertidumbre, y pasó su tiempo tratando de inventar formas ingeniosas de sortearlo. Pero lo que realmente le molestaba de la mecánica cuántica era su aparente falta de localización: lo que ocurre en un punto del espacio puede aparentemente tener consecuencias inmediatas para los experimentos realizados muy lejos. Le llevó un tiempo codificar sus preocupaciones en una objeción bien formulada, y al hacerlo ayudó a iluminar una de las características más profundas del mundo cuántico: el fenómeno del *enredo*.

El enredo surge porque sólo hay una función de onda para todo el universo, no funciones de onda separadas para cada parte de él. ¿Cómo sabemos eso? ¿Por qué no podemos tener una función de onda para cada partícula o campo?

Considere un experimento en el que disparamos dos electrones entre sí, moviéndose con velocidades iguales y opuestas. Debido a que ambos tienen una carga eléctrica negativa, se repelen entre sí. Clásicamente, si se nos dieran las posiciones y velocidades iniciales de los electrones, podríamos calcular con precisión las direcciones en las que cada uno de ellos se dispersaría. Mecánicamente cuántica, todo lo que podemos hacer es calcular la probabilidad de que cada uno de ellos se observe en varios caminos después de que interactúen entre sí. La función de onda de cada partícula se extiende en un patrón aproximadamente esférico, hasta que finalmente la observamos y fijamos una dirección definida en la que se estaba moviendo.

Cuando hacemos este experimento, y observamos los electrones después de que se han dispersado, notamos algo importante. Como los electrones tenían inicialmente velocidades iguales y opuestas, el momento total fue cero. Y el momento se conserva, por lo que el momento posterior a la interacción también debería ser cero. Esto significa que mientras que los electrones pueden emerger moviéndose en varias direcciones diferentes, cualquiera que sea la dirección en la que uno de ellos se mueva, el otro se mueve precisamente en la dirección opuesta.



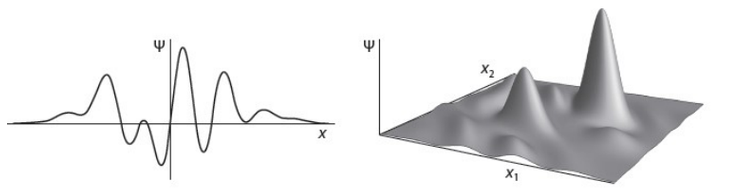
Es gracioso, cuando lo piensas. El primer electrón tiene una probabilidad de dispersarse en varios ángulos, y también lo hace el segundo. Pero si cada uno de ellos tuviera una función de onda separada, esas dos probabilidades no estarían relacionadas. Podríamos imaginarnos observando uno de los electrones y midiendo la dirección en la que se mueve. El otro no se vería afectado. ¿Cómo podría saber que se supone que se está moviendo en la dirección opuesta cuando en realidad lo medimos?

Ya hemos dado la respuesta. Los dos electrones no tienen funciones de onda separadas; su comportamiento se describe por la función de onda única del universo. En este caso podemos ignorar el resto del universo y centrarnos en estos dos electrones. Pero no podemos ignorar uno de los electrones y centrarnos en el otro; las predicciones que hacemos para las observaciones de cualquiera de ellos pueden verse dramáticamente afectadas por el resultado de las observaciones del otro. Los electrones están enredados.

Una función de onda es una asignación de un número complejo, la amplitud, a cada posible resultado de observación, y el cuadrado de la amplitud es igual a la probabilidad de que observemos

ese resultado si hacemos esa medición. Cuando hablamos de más de una partícula, eso significa que asignamos una amplitud a cada posible resultado de la observación de todas las partículas a la vez. Si lo que estamos observando son posiciones, por ejemplo, la función de onda del universo puede ser pensada como la asignación de una amplitud a cada posible combinación de posiciones para todas las partículas del universo.

Te preguntarás si es posible visualizar algo así. Podemos hacerlo para el simple caso de una sola partícula que imaginamos que sólo se mueve a lo largo de una dimensión, digamos, un electrón confinado a un fino cable de cobre: dibujamos una línea que representa la posición de la partícula, y trazamos una función que representa la amplitud para cada posición. (Generalmente engañamos incluso en este contexto simple trazando sólo un número real en lugar de un número complejo, pero que así sea). Para dos partículas confinadas al mismo movimiento unidimensional, podríamos dibujar un plano bidimensional que represente las posiciones de cada una de las dos partículas, y luego hacer un trazado de contorno tridimensional para la función de onda. Obsérvese que no se trata de una partícula en un espacio bidimensional; son dos partículas, cada una en un espacio unidimensional, por lo que la función de onda se define en el plano bidimensional que describe ambas posiciones.



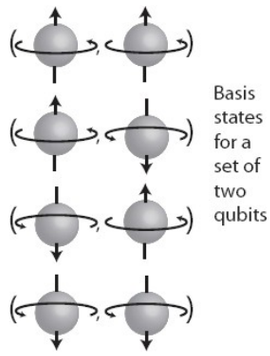
Wave function for one particle with position x Wave function for two particles with positions x_1, x_2

Debido a la velocidad finita de la luz y al tiempo finito desde el Big Bang, sólo podemos ver una región finita del cosmos, que denominamos "el universo observable". Hay aproximadamente 1.088 partículas en el universo observable, la mayoría fotones y neutrinos. Ese es un número mucho mayor que dos. Y cada partícula está localizada en un espacio tridimensional, no sólo en una línea unidimensional. ¿Cómo se supone que vamos a visualizar una función de onda que asigne una amplitud a cada posible configuración de 1088 partículas distribuidas en el espacio tridimensional?

No lo estamos. Lo siento. La imaginación humana no fue diseñada para visualizar los enormes espacios matemáticos que se usan rutinariamente en la mecánica cuántica. Para sólo una o dos partículas, podemos confundirnos; más que eso, y tenemos que describir las cosas con palabras y ecuaciones. Afortunadamente, la ecuación de Schrödinger es directa y definitiva en lo que dice sobre el comportamiento de la función de onda. Una vez que entendemos lo que sucede con dos partículas, la generalización a 1088 partículas es sólo matemática.

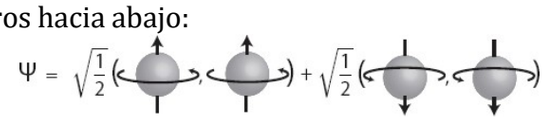
El hecho de que las funciones de las ondas sean tan grandes puede hacer que pensar en ellas sea un poco difícil. Afortunadamente podemos arrojar casi todo lo interesante que hay que decir sobre el enredo en el contexto mucho más simple de sólo unos pocos qubits.

Tomando prestada una caprichosa tradición en la literatura de la criptografía, a los físicos cuánticos les gusta considerar a dos personas llamadas Alice y Bob que comparten qubits entre sí. Así que imaginemos dos electrones, *A de* Alice y *B de* Bob. Los giros de esos dos electrones constituyen un sistema de dos qubits, y se describen por una función de onda correspondiente. La función de onda asigna una amplitud a cada configuración del sistema en su conjunto, con respecto a algo que podríamos observar sobre él, como su espín en dirección vertical. Así que hay cuatro posibles resultados de medición: ambos giros están arriba, ambos giros están abajo, *A está* arriba y *B está* abajo, y *A está abajo* y *B está arriba*. El estado del sistema es una superposición de estas cuatro posibilidades, que son los estados base. Dentro de cada conjunto de paréntesis, el primer giro es el de Alicia, y el segundo es el de Bob.



Sólo porque tengamos dos qubits, no significa que estén necesariamente enredados. Consideremos un estado que es simplemente uno de los estados base, digamos, aquel en el que ambas qubits son spin-up. Si Alicia mide su qubits a lo largo del eje vertical, siempre obtendrá spin-up, y lo mismo para Bob. Si Alicia mide su spin a lo largo del eje horizontal, tiene una probabilidad de cincuenta y cinco de obtener spin-derecha o spin-izquierda, y de nuevo lo mismo para Bob. Pero en cada caso, no aprendemos nada sobre lo que Bob verá al saber lo que Alice vio. Por eso a menudo podemos hablar casualmente de "la función de onda de una partícula", aunque sabemos que cuando las diferentes partes del sistema se desenredan entre sí, es como si tuvieran sus propias funciones de onda.

En su lugar, consideremos una superposición igual de dos estados base, uno con ambos giros hacia arriba y el otro con ambos giros hacia abajo:

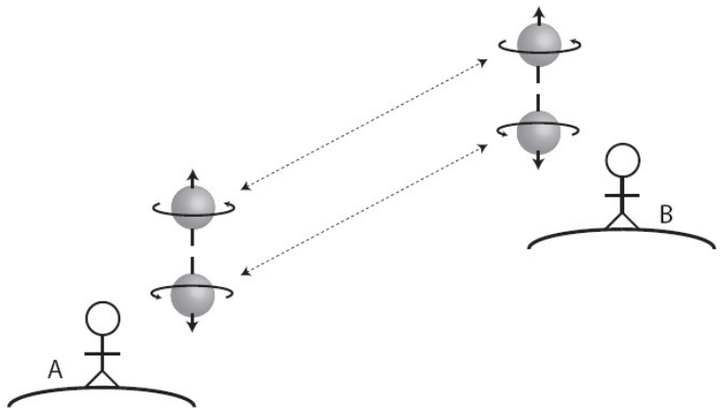


Si Alicia mide su giro a lo largo del eje vertical, tiene una probabilidad de cincuenta y cinco de obtener un giro hacia arriba o hacia abajo, y lo mismo para Bob. La diferencia ahora es que si conocemos el resultado de Alice antes de que Bob haga su medición, sabemos lo que Bob verá con un 100% de confianza: verá lo mismo que Alice. En el lenguaje de la mecánica cuántica de los libros de texto, la medición de Alice colapsa la función de la onda en uno de los dos estados base, dejando a Bob con un resultado determinante. (En el lenguaje de Muchos Mundos, la medición de Alice ramifica la función de onda, creando dos Bobs diferentes, cada uno de los cuales obtendrá un determinado resultado). Eso es el enredo en la acción.

Después de la Conferencia de Solvay de 1927, Einstein seguía convencido de que la mecánica cuántica, especialmente según la interpretación de la escuela de Copenhague, hacía un muy buen trabajo al hacer predicciones para los resultados experimentales, pero se quedaba muy corto como teoría completa del mundo físico. Sus preocupaciones fueron finalmente redactadas para su publicación en 1935 con sus colaboradores Boris Podolsky y Nathan Rosen, en un documento que se conoce universalmente como simplemente *EPR*. Einstein dijo más tarde que las ideas primarias habían sido suyas, Rosen había hecho los cálculos, y Podolsky había hecho gran parte de la escritura.

EPR consideró la posición y el momento de dos partículas que se mueven en direcciones opuestas, pero es más fácil para nosotros hablar de qubits. Consideremos dos giros que están en el estado enredado escrito arriba. (Es muy fácil crear tal estado en el laboratorio.) Alice se queda en casa con su qubit, pero Bob toma el suyo y se embarca en un largo viaje... digamos que salta en un cohete y vuela a Alfa Centauro, a cuatro años luz de distancia. El enredo entre dos partículas no se desvanece al separarse; mientras ni Alice ni Bob midan los giros de sus qubits, el estado cuántico general seguirá siendo el mismo.

Una vez que Bob llega a salvo a Alfa Centauri, Alice finalmente mide el giro de su partícula, a lo largo de un eje vertical acordado. Antes de esa medición, estábamos completamente inseguros de lo que tal observación revelaría para su giro, y de la misma manera para el de Bob. Supongamos que Alicia observa el spin-up. Entonces, por las reglas de la mecánica cuántica, sabemos inmediatamente que Bob también observará el spin-up, siempre que se ponga a hacer una medición.



Eso es raro. Treinta años antes, Einstein había establecido las reglas de la teoría especial de la relatividad, que dice, entre otras cosas, que las señales no pueden viajar más rápido que la velocidad de la luz. Y sin embargo aquí estamos diciendo que según la mecánica cuántica, una medida que Alice hace aquí y ahora tiene un efecto inmediato en el qubit de Bob, aunque esté a cuatro años luz de distancia. ¿Cómo sabe el qubit de Bob que el de Alice ha sido medido, y cuál fue el resultado? Esta es la "acción espeluznante a distancia" que tanto le preocupaba a Einstein.

No es necesariamente tan malo como parece. Lo primero que se puede preguntar, al ser informados de que la mecánica cuántica aparentemente envía influencias más rápido que la velocidad de la luz, es si podríamos o no aprovechar este fenómeno para comunicarnos instantáneamente a través de grandes distancias. ¿Podemos construir un teléfono de enredo cuántico, para el cual la velocidad de la luz no sea una limitación en absoluto?

No, no podemos. Esto es bastante claro en nuestro simple ejemplo: si Alice mide la aceleración, sabe instantáneamente que Bob también la medirá cuando llegue a ella. Pero Bob no lo sabe. Para que él sepa cuál es el spin de su partícula, Alice tiene que enviarle el resultado de su medición por medios convencionales, que están limitados por la velocidad de la luz.

Podrías pensar que hay una laguna jurídica: ¿Qué pasa si Alice no sólo mide su qubit y encuentra una respuesta aleatoria, sino que obliga a su respuesta a ser "spin-up"? Entonces Bob también obtendría un spin-up. Eso parecería como si la información se hubiera transmitido instantáneamente.

El problema es que no hay una forma sencilla de empezar con un sistema cuántico que está en superposición y medirlo de tal manera que podamos forzar una respuesta particular. Si Alice simplemente mide su giro, subirá o bajará con iguales probabilidades, sin "si", "y" o "peros". Lo que Alice puede hacer es manipular su giro antes de medirlo, forzándolo a que sea 100 por ciento de giro en lugar de una superposición. Por ejemplo, puede disparar un fotón a su electrón, con las propiedades adecuadas de que el fotón deja al electrón solo si el electrón era de espín, y voltea el electrón a espín si era de espín. Ahora el electrón original de Alicia se medirá definitivamente como spin-up. Pero ese electrón ya no está enredado con el de Bob. Más bien, el enredo se ha transferido al fotón, que está en una superposición de "dejó solo el electrón de Alice" y "chocó con el electrón de Alice". El electrón de Bob no está afectado en absoluto, y va a obtener spin-up o spin-down con una probabilidad del cincuenta por ciento, por lo que no se ha transmitido ninguna información.

Esta es una característica general del entrelazamiento cuántico: el teorema de la *no-señalización*, según el cual un par de partículas enredadas no puede utilizarse realmente para transmitir información entre dos partes más rápido que la luz. Así pues, la mecánica cuántica parece estar explotando una sutil laguna jurídica, violando el espíritu de la relatividad (nada viaja más rápido que la velocidad de la luz) mientras obedece la letra de la ley (las partículas físicas reales, y cualquier información útil que puedan transmitir, no pueden viajar más rápido que la velocidad de la luz).

La llamada paradoja *EPR* (que no es una paradoja en absoluto, sólo una característica de la mecánica cuántica) va más allá de la simple preocupación por la acción espeluznante a distancia. Einstein pretendía mostrar no sólo que la mecánica cuántica era espeluznante, sino que no podía ser una teoría completa, que tenía que haber algún modelo comprensivo subyacente para el que la mecánica cuántica fuera simplemente una aproximación útil.

La EPR creía en el principio de localidad: las cantidades físicas que describen la naturaleza se definen en puntos específicos del espacio tiempo, no se extienden por todo el lugar, e interactúan

directamente sólo con otras cantidades cercanas, no a distancia. Dicho de otra manera, dada la restricción de la velocidad de la luz de la relatividad especial, la localidad parecería implicar que nada de lo que podamos hacer a una partícula en un lugar puede afectar instantáneamente las mediciones que podríamos realizar en otra partícula muy lejana.

A primera vista, el hecho de que dos partículas muy separadas puedan enredarse parece implicar que la localidad es violada en la mecánica cuántica. Pero EPR quería ser un poco más minucioso, y establecer que no había un método inteligente que hiciera que todo pareciera local.

Sugirieron el siguiente principio: si tenemos un sistema físico en un estado específico, y hay una medición que podemos hacer en ese sistema de tal manera que sabemos con un 100% de certeza cuál será el resultado, asociamos un *elemento de la realidad* con ese resultado de la medición. En la mecánica clásica, la posición y el momento de cada partícula se califican como elementos de la realidad. En la mecánica cuántica, si tenemos un qubit en un estado de spin-up puro, hay un elemento de la realidad que corresponde al spin en la dirección vertical, pero no es necesario que haya un elemento de la realidad que corresponda al spin horizontal, ya que no sabemos lo que obtendremos cuando lo midamos. Una teoría "completa", en la formulación de la EPR, es aquella en la que cada elemento de la realidad tiene una contrapartida directa en la propia teoría, y sostenían que la mecánica cuántica no podía ser completa según este criterio.

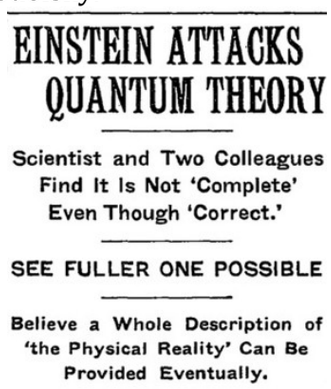
Tomemos a Alice y Bob y sus enredados qubits, e imaginemos que Alice acaba de medir el giro vertical de su partícula, encontrando que apunta hacia arriba. Ahora sabemos que Bob también medirá el spin-up, incluso si Bob no lo sabe. Así que por las luces de EPR, hay un elemento de realidad unido a la partícula de Bob, diciendo que el spin-up está hacia arriba. No es que este elemento de la realidad haya nacido cuando Alicia hizo su medición, ya que la partícula de Bob está muy lejos, y la localidad dice que el elemento de la realidad debe estar ubicado donde está la partícula; debe haber estado allí todo el tiempo.

Pero ahora imagina que Alicia no hizo la medición del giro vertical en absoluto, sino que midió el giro de su partícula a lo largo del eje horizontal. Digamos que ella mide el spin-derecha de la partícula. El enmarañado estado cuántico con el que empezamos nos asegura que Bob obtendrá el mismo resultado que Alicia, sin importar la dirección que elija para medir su giro. Así que sabemos que Bob también mediría el spin-derecho, y por las luces de EPR hay y fue todo el tiempo un elemento de la realidad que dice "spin-derecho para el qubit de Bob si se mide a lo largo del eje horizontal".

No hay forma de que la partícula de Alice o la de Bob sepan de antemano qué medida iba a hacer Alice. Por lo tanto, el qubit de Bob debe venir equipado con elementos de la realidad que garanticen que su giro se elevaría si se mide verticalmente, y justo si se mide horizontalmente.

Eso es exactamente lo que el principio de incertidumbre dice que no puede suceder. Si se determina exactamente el giro vertical, el giro horizontal es completamente desconocido, y viceversa, al menos según las reglas convencionales de la mecánica cuántica. No hay nada en el formalismo cuántico que pueda determinar tanto un giro vertical como un giro horizontal al mismo tiempo. Por lo tanto, EPR concluye triunfalmente, debe haber algo que falta: la mecánica cuántica no puede ser una descripción completa de la realidad física.

El artículo de la EPR causó un revuelo que llegó mucho más allá de la comunidad de físicos profesionales. El *New York Times*, habiendo sido avisado por Podolsky, publicó un artículo de primera plana sobre las ideas. Esto indignó a Einstein, quien escribió una carta severa que el *Times publicó*, en la que condenaba la discusión anticipada de los resultados científicos en la "prensa secular". Se ha dicho que nunca volvió a hablar con Podolsky.



EINSTEIN ATTACKS QUANTUM THEORY

Scientist and Two Colleagues Find It Is Not 'Complete' Even Though 'Correct.'

SEE FULLER ONE POSSIBLE

Believe a Whole Description of 'the Physical Reality' Can Be Provided Eventually.

(Courtesy of Wikipedia)

La respuesta de los científicos profesionales también fue rápida. Niels Bohr escribió una rápida respuesta al documento EPR, que muchos físicos afirmaron que resolvió todos los rompecabezas. Lo

que no está tan claro es precisamente cómo se suponía que el trabajo de Bohr había logrado eso; tan brillante y creativo como era como pensador, Bohr nunca fue un comunicador especialmente claro, como él mismo admitió. Su trabajo estaba lleno de frases como "en esta etapa surge el problema esencial de una influencia en las condiciones precisas que definen los posibles tipos de predicción que se refieren al comportamiento posterior del sistema". A grandes rasgos, su argumento era que no debemos atribuir elementos de la realidad a los sistemas sin tener en cuenta cómo van a ser observados. Lo que es real, parece sugerir Bohr, depende no sólo de lo que medimos, sino de cómo elegimos medirlo.

Einstein y sus colaboradores expusieron lo que consideraban criterios razonables para una teoría física -localidad, y asociar elementos de la realidad a cantidades determinadamente predecibles- y demostraron que la mecánica cuántica era incompatible con ellos. Pero no concluyeron que la mecánica cuántica estaba equivocada, sólo que estaba incompleta. Permanecía viva la esperanza de que algún día encontraríamos una teoría mejor que fuera local y respetuosa de la realidad.

Esa esperanza fue definitivamente aplastada por John Stewart Bell, un físico de Irlanda del Norte que trabajaba en el laboratorio del CERN en Ginebra, Suiza. Se interesó en los fundamentos de la mecánica cuántica en la década de 1960, en un momento de la historia de la física en el que se consideraba de muy mala reputación pasar tiempo pensando en esas cosas. Hoy en día el teorema de Bell sobre el entrelazamiento se considera uno de los resultados más importantes de la física.

El teorema nos pide que consideremos una vez más a Alice y Bob y sus enredados qubits con giros alineados. (Tales estados cuánticos se conocen ahora como *estados de Bell*, aunque fue David Bohm quien primero conceptualizó el rompecabezas EPR en estos términos). Imaginemos que Alicia mide el spin vertical de su partícula, y obtiene el resultado de que es spin-up. Ahora sabemos que si Bob mide el spin vertical de su partícula, también obtendrá spin-up. Además, por las reglas ordinarias de la mecánica cuántica sabemos que si Bob elige medir el spin horizontal en su lugar, obtendrá spin-derecha y spin-izquierda con una probabilidad del cincuenta por ciento. Podemos decir que si Bob mide el spin vertical, la correlación entre su resultado y el de Alicia será del 100 por ciento (sabemos exactamente lo que obtendrá), mientras que si mide el spin horizontal, habrá una correlación del 0 por ciento (no tenemos ni idea de lo que obtendrá).

¿Y qué pasa si Bob, aburrido de estar solo en una nave espacial que orbita alrededor de Alfa Centauri, decide medir el giro de su partícula a lo largo de algún eje entre la horizontal y la vertical? (Por comodidad imagina que Alice y Bob comparten un gran número de pares de Campanas enredadas, así que pueden seguir haciendo estas mediciones una y otra vez, y sólo nos importa lo que pasa cuando Alice observa el spin-up). Entonces Bob normalmente, pero no siempre, observará el spin que se apunta a lo largo de cualquier dirección que esté más estrechamente alineada con la vertical "arriba". De hecho, podemos hacer las matemáticas: si el eje de Bob está a 45 grados, exactamente a mitad de camino entre la vertical y la horizontal, habrá una correlación del 71 por ciento entre sus resultados y los de Alice. (Eso es uno sobre la raíz cuadrada de dos, si te preguntas de dónde viene el número).

Lo que Bell mostró, bajo ciertas suposiciones superficialmente razonables, es que esta predicción cuántica-mecánica es imposible de reproducir en cualquier teoría local. De hecho, demostró una estricta desigualdad: lo mejor que se puede hacer sin algún tipo de acción espeluznante a distancia sería lograr una correlación del 50 por ciento entre Alice y Bob si sus medidas se giraran 45 grados. La predicción cuántica del 71% de correlación viola la desigualdad de Bell. Hay una diferencia clara e innegable entre el sueño de una simple dinámica local subyacente, y las predicciones del mundo real de la mecánica cuántica.

Supongo que actualmente está pensando para sí mismo: "Oye, ¿qué quieres decir con que Bell hizo suposiciones superficialmente razonables? Explíquelas. Yo decidiré por mí mismo lo que encuentro razonable y lo que no".

Me parece justo. Hay dos suposiciones detrás del teorema de Bell en particular que uno podría querer dudar. Una está contenida en la simple idea de que Bob "decide" medir el giro de su qubit a lo largo de un cierto eje. Un elemento de elección humana, o libre albedrío, parece haberse colado en nuestro teorema sobre la mecánica cuántica. Eso no es algo único, por supuesto; los científicos siempre asumen que pueden elegir medir lo que quieran. Pero en realidad creemos que es sólo una forma conveniente de hablar, e incluso esos científicos están compuestos de partículas y fuerzas que en sí mismas obedecen a las leyes de la física.

Así que podemos imaginarnos invocando *el superdeterminismo: la* idea de que las verdaderas leyes de la física son totalmente deterministas (no hay aleatoriedad en ninguna parte), y además que las condiciones iniciales del universo se establecieron en el Big Bang precisamente de tal manera que nunca se van a tomar ciertas "decisiones". Es concebible que se pueda inventar una teoría superdeterminista perfectamente local que imite las predicciones del entrelazamiento cuántico, simplemente porque el universo fue predispuesto para que pareciera así. Esto parece desagradable para la mayoría de los físicos; si se puede arreglar delicadamente la teoría para hacer eso, básicamente se puede arreglar para hacer lo que se quiera, y en ese punto, ¿por qué estamos haciendo física? Pero algunas personas inteligentes están persiguiendo la idea.

La otra suposición potencialmente dudosa parece incontrovertible a primera vista: que las mediciones tienen resultados definitivos. Cuando observas el giro de una partícula, obtienes un resultado real, ya sea un giro hacia arriba o hacia abajo a lo largo de cualquier eje con el que la estás midiendo. Parece razonable, ¿no?

Pero espera. Sabemos de una teoría en la que las mediciones no tienen resultados definitivos: la mecánica cuántica austera de Everet. Allí, simplemente no es cierto que subamos o bajemos cuando medimos el espín de un electrón; en una rama de la función de onda subimos, en la otra bajamos. El universo en su conjunto no tiene un único resultado para esa medición; tiene varios. Eso no significa que el teorema de Bell esté equivocado en muchos mundos; los teoremas matemáticos son inequívocamente correctos, dadas sus suposiciones. Sólo significa que el teorema no se aplica. El resultado de Bell no implica que tengamos que incluir la acción espeluznante a distancia en la mecánica cuántica de Everet, como lo hace para las aburridas viejas teorías de un solo mundo. Las correlaciones no se producen por ningún tipo de influencia que se transmita más rápido que la luz, sino por la ramificación de la función de onda en diferentes mundos, en los que ocurren cosas correlacionadas.

Para un investigador en los fundamentos de la mecánica cuántica, la relevancia del teorema de Bell en su trabajo depende de lo que exactamente está tratando de hacer. Si te has dedicado a la tarea de inventar una nueva versión de la mecánica cuántica desde cero, en la que las mediciones tienen resultados definitivos, la desigualdad de Bell es el punto de referencia más importante que debes tener en cuenta. Si, por otro lado, estás contento con Muchos Mundos y estás tratando de descifrar cómo mapear la teoría en nuestra experiencia observada, el resultado de Bell es una consecuencia automática de las ecuaciones subyacentes, no una restricción adicional de la que tengas que preocuparte para seguir adelante.

Una de las cosas fantásticas del teorema de Bell es que convierte la supuesta fantasía del entrelazamiento cuántico en una pregunta experimental directa: ¿la naturaleza exhibe correlaciones intrínsecamente no locales entre partículas lejanas, o no? Estará feliz de escuchar que se han hecho experimentos, y que las predicciones de la mecánica cuántica se han verificado espectacularmente cada vez. Hay una tradición en los medios populares de escribir artículos con titulares sin aliento como "¡La realidad cuántica es aún más extraña de lo que se creía!" Pero cuando se miran los resultados que están reportando, es otro experimento que confirma exactamente lo que un mecánico cuántico competente todo el tiempo usando la teoría que había sido establecida en 1927, o al menos en 1935. Entendemos la mecánica cuántica enormemente mejor ahora que entonces, pero la teoría en sí misma no ha cambiado.

Lo que no quiere decir que los experimentos no sean importantes o impresionantes; lo son. El problema de probar las predicciones de Bell, por ejemplo, es que se trata de asegurar que las correlaciones adicionales predichas por la mecánica cuántica no podrían haber surgido debido a alguna furtiva correlación clásica preexistente. ¿Cómo sabemos si algún acontecimiento oculto del pasado afectó secretamente a la forma en que elegimos medir nuestro giro, o cuál fue el resultado de la medición, o ambos?

Los físicos se han esforzado mucho por eliminar estas posibilidades, y ha surgido una industria artesanal para hacer "pruebas de campana sin lagunas". Un resultado reciente quería eliminar la posibilidad de que un proceso desconocido en el laboratorio influyera en la elección de cómo medir el giro. Así que en lugar de dejar que un asistente de laboratorio eligiera la medida, o incluso usar un generador de números aleatorios sentado en una mesa cercana, el experimento hizo esa elección basándose en la polarización de los fotones emitidos por estrellas a muchos años luz de distancia. Si hubo alguna nefasta conspiración para hacer que el mundo pareciera cuántico-mecánico, tuvo que haber sido establecida hace cientos de años, cuando la luz dejó esas estrellas. Es posible, pero no parece probable.

Parece que la mecánica cuántica tiene razón de nuevo. Hasta ahora, la mecánica cuántica siempre ha tenido razón.

PART TWO

SPLITTING

6

Dividiendo el Universo

Decoherencia y mundos paralelos

El documento de Einstein-Podolsky-Rosen (EPR) de 1935 sobre el entrelazamiento cuántico, y la respuesta de Niels Bohr a él, fueron las últimas salvas públicas importantes en los debates de Bohr-Einstein sobre los fundamentos de la mecánica cuántica. Bohr y Einstein habían mantenido correspondencia sobre la teoría cuántica poco después de que Bohr propusiera su modelo de órbitas de electrones cuantificados en 1913, y su disputa llegó a su punto álgido en la Conferencia de Solvay de 1927. En el recuento popular, Einstein plantearía algunas objeciones al consenso de Copenhague, que se estaba consolidando rápidamente, durante las conversaciones en el taller con Bohr, que pasaría la tarde preocupándose por ello, y luego en el desayuno Bohr presentaría triunfalmente su réplica al castigado Einstein. Se nos dice que Einstein simplemente no podía entender el hecho del principio de incertidumbre y la noción de que Dios juega a los dados con el universo.

Eso no es lo que pasó. Las principales preocupaciones de Einstein no eran con la aleatoriedad sino con el realismo y la localidad. Su determinación de rescatar estos principios culminó en el documento EPR y su argumento de que la mecánica cuántica debe ser incompleta. Pero para entonces la batalla de las relaciones públicas se había perdido, y el enfoque de Copenhague sobre la mecánica cuántica había sido adoptado por los físicos de todo el mundo, que entonces se pusieron a aplicar la mecánica cuántica a los problemas técnicos de la física atómica y nuclear, así como a los campos emergentes de la física de partículas y la teoría de campos cuánticos. Las implicaciones del propio documento de la EPR fueron en gran medida ignoradas por la comunidad. Luchar con las confusiones en el corazón de la teoría cuántica, en lugar de trabajar en problemas de física más tangibles, comenzó a ser considerado como un esfuerzo un tanto excéntrico. Algo que podría ocupar el tiempo de los físicos anteriormente productivos una vez que llegaran a cierta edad y estuvieran listos para abandonar el trabajo real.

En 1933, Einstein dejó Alemania y tomó un puesto en el nuevo Instituto de Estudios Avanzados de Princeton, Nueva Jersey, donde permanecería hasta su muerte en 1955. Su trabajo técnico después de 1935 se centró en gran medida en la relatividad general clásica y en su búsqueda de una teoría unificada de la gravitación y el electromagnetismo, pero nunca dejó de pensar en la mecánica cuántica. Bohr visitaba ocasionalmente Princeton, donde él y Einstein mantenían su diálogo.

John Archibald Wheeler se unió a la facultad de física de la Universidad de Princeton, en el camino entre el Instituto y Einstein, como profesor asistente en 1934. En años posteriores, Wheeler se daría a conocer como uno de los expertos mundiales en relatividad general, popularizando los términos "agujero negro" y "agujero de gusano", pero al principio de su carrera se concentró en los problemas cuánticos. Había estudiado brevemente bajo la dirección de Bohr en Copenhague, y en 1939 él y Bohr publicaron un documento pionero sobre la fisión nuclear. Wheeler sentía gran admiración por Einstein, pero veneraba a Bohr; como diría más tarde: "Nada ha hecho más para convencerme de que alguna vez existieron amigos de la humanidad con la sabiduría humana de Confucio y Buda, Jesús y Pericles, Erasmo y Lincoln, que pasear y hablar bajo las hayas del bosque de Klampenborg con Niels Bohr".

Wheeler impactó en la física de varias maneras, una de las cuales fue en la tutoría de talentosos estudiantes de postgrado, incluyendo futuros ganadores del Premio Nobel como Richard Feynman y Kip Thorne. Uno de esos estudiantes fue Hugh Everett III, que introduciría un enfoque dramáticamente nuevo para pensar en los fundamentos de la mecánica cuántica. Ya hemos esbozado su idea básica -la función de onda representa la realidad, evoluciona sin problemas, y que la evolución conduce a múltiples mundos distintos cuando se realiza una medición cuántica- pero ahora tenemos las herramientas para hacerlo bien.

La propuesta de Everett, que finalmente se convirtió en su tesis de doctorado en Princeton en 1957, puede ser considerada como la más pura encarnación de uno de los principios favoritos de Wheeler: que la física teórica debe ser "radicalmente conservadora". La idea es que una teoría física exitosa es

aquella que ha sido probada con datos experimentales, pero sólo en regímenes que los experimentadores son realmente capaces de alcanzar. Uno debería ser conservador, en el sentido de que deberíamos comenzar con las teorías y principios que ya están establecidos como exitosos, en lugar de introducir arbitrariamente nuevos enfoques cada vez que se encuentran nuevos fenómenos. Pero también hay que ser radical, en el sentido de que las predicciones e implicaciones de nuestras teorías deben tomarse en serio en regímenes muy distintos de los que se han probado. Las frases "deberíamos empezar" y "deberíamos ser tomados en serio" son cruciales aquí; por supuesto, las nuevas teorías están justificadas cuando se demuestra que las antiguas contradicen descaradamente los datos, y el hecho de que una predicción se tome en serio no significa que no deba revisarse a la luz de la nueva información. Pero la filosofía de Wheeler era que debíamos empezar prudentemente, con los aspectos de la naturaleza que creíamos entender, y luego actuar con audacia, extrapolando nuestras mejores ideas a los extremos del universo.

Parte de la inspiración de Everett fue la búsqueda de una teoría de la gravedad cuántica, en la que Wheeler se había interesado recientemente. El resto de la física, la materia, el electromagnetismo, las fuerzas nucleares, parece encaja cómodamente en el marco de la mecánica cuántica. Pero la gravedad era (y sigue siendo) una excepción obstinada. En 1915, Einstein propuso la teoría general de la relatividad, según la cual el propio espacio tiempo es una entidad dinámica cuyas curvaturas y deformaciones son lo que usted y yo percibimos como la fuerza de gravedad. Pero la relatividad general es una teoría completamente clásica, con análogos de posición y momento para la curvatura del espacio-tiempo, y sin límites en cuanto a cómo podríamos medirlos. Tomar esa teoría y "cuantificarla", construir una teoría de las funciones de onda del espacio-tiempo en lugar de los espacio-tiempos clásicos particulares ha demostrado ser difícil.

Hugh Everett III
(Cortesía del Archivo Hugh Everett III de la Universidad de California, Irvine, y Mark Everett)

Las dificultades de la gravedad cuántica son tanto técnicas -los cálculos tienden a explotar y dar respuestas infinitamente grandes- como conceptuales. Incluso en la mecánica cuántica, aunque no se pueda decir con precisión dónde está una determinada partícula, la noción de "un punto en el espacio" está perfectamente bien definida. Podemos especificar una ubicación y preguntar cuál es la probabilidad de encontrar la partícula cerca. Pero si la realidad no consiste en cosas distribuidas por el espacio, sino que es una función de onda cuántica que describe superposiciones de diferentes posibles espacio-tiempos, ¿cómo podemos siquiera preguntar "dónde" se observa una cierta partícula?

Los rompecabezas empeoran cuando nos enfrentamos al problema de la medición. En la década de 1950 la escuela de Copenhague se estableció como doctrina, y los físicos habían hecho las paces con la idea de que las funciones de las ondas se colapsaran cuando se realizaba una medición. Incluso estaban dispuestos a aceptar el proceso de medición como una parte fundamental de nuestra mejor descripción de la naturaleza. O, al menos, no preocuparse demasiado por ello.

Pero, ¿qué sucede cuando el sistema cuántico que se está considerando es el universo entero? Crucial para el enfoque de Copenhague es la distinción entre el sistema cuántico que se mide y el observador clásico que hace la medición. Si el sistema es el universo en su conjunto, todos estamos dentro de él; no hay ningún observador externo al que podamos apelar. Años más tarde, Stephen Hawking y otros estudiarían la cosmología cuántica para discutir cómo un universo autónomo podría tener un momento más temprano en el tiempo, presumiblemente identificado con el Big Bang.

Mientras Wheeler y otros pensaban en los desafíos técnicos de la gravedad cuántica, Everett se fascinó con estos problemas conceptuales, especialmente con el manejo de las mediciones. Las semillas de la formulación de Muchos Mundos se remontan a una discusión a altas horas de la noche de 1954 con sus compañeros jóvenes físicos Charles Misner (también estudiante de Wheeler) y Aage

Petersen (un asistente de Bohr, de visita desde Copenhague). Todas las partes están de acuerdo en que se consumieron copiosas cantidades de jerez en esa ocasión.

Claramente, Everett razonó que si vamos a hablar del universo en términos cuánticos, no podemos crear un reino clásico separado. Cada parte del universo tendrá que ser tratada de acuerdo a las reglas de la mecánica cuántica, incluyendo los observadores dentro de ella. Sólo habrá un único estado cuántico, descrito por lo que Everett llamó la "función de onda universal" (y que hemos estado llamando "la función de onda del universo").

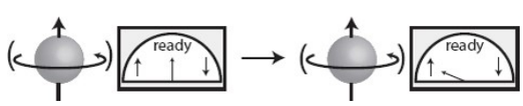
Si todo es cuántico, y el universo está descrito por una función de onda única, ¿cómo se supone que se va a realizar la medición? Debe ser, razonó Everett, cuando una parte del universo interactúa con otra parte del universo de alguna manera apropiada. Eso es algo que va a suceder automáticamente, se dio cuenta, simplemente debido a la evolución de la función de onda universal según la ecuación de Schrödinger. No necesitamos invocar ninguna regla especial para la medición en absoluto; las cosas se chocan entre sí todo el tiempo.

Es por esta razón que Everett tituló su eventual trabajo sobre el tema "Formulación del estado relativo de la mecánica cuántica". Al interactuar un aparato de medición con un sistema cuántico, los dos se enredan entre sí. No hay colapsos de funciones de onda o reinos clásicos. El propio aparato evoluciona en una superposición, enredado con el estado de la cosa que se está observando. El resultado de la medición aparentemente definitivo ("el electrón es spin-up") es sólo relativo a un estado particular del aparato ("medí el electrón para ser spin-up"). Los otros posibles resultados de la medición siguen existiendo y son perfectamente reales, al igual que los mundos separados. Todo lo que tenemos que hacer es enfrentarnos valientemente a lo que la mecánica cuántica ha estado tratando de decirnos todo el tiempo.

Seamos un poco más explícitos sobre lo que pasa cuando se hace una medición, según la teoría de Everett.

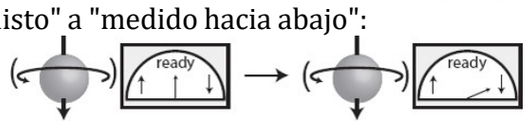
Imaginemos que tenemos un electrón girando, que se podría observar que está en estado de spin-up o spin-down con respecto a algún eje elegido. Antes de la medición, el electrón estará típicamente en alguna superposición de arriba y abajo. También tenemos un aparato de medición, que es un sistema cuántico en sí mismo. Imaginemos que puede estar en superposiciones de tres posibilidades diferentes: puede haber medido el spin para estar arriba, puede haber medido el spin para estar abajo, o puede no haber medido aún el spin en absoluto, lo que llamamos el estado "listo".

El hecho de que el aparato de medición haga su trabajo nos dice cómo evoluciona el estado cuántico del sistema combinado spin+aparato según la ecuación de Schrödinger. Es decir, si empezamos con el aparato en su estado listo y el espín en un estado puramente de espín, tenemos la garantía de que el aparato evoluciona a un estado puro de medición, como tal:

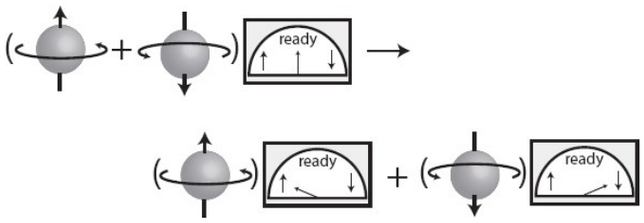


El estado inicial de la izquierda puede leerse como "el giro está en el estado arriba, y el aparato está en su estado listo", mientras que el de la derecha, donde el puntero indica la flecha hacia arriba, es "el giro está en el estado arriba, y el aparato ha medido que está arriba".

De la misma manera, la capacidad de medir con éxito un giro puro hacia abajo implica que el aparato debe evolucionar de "listo" a "medido hacia abajo":



Lo que queremos, por supuesto, es entender lo que sucede cuando el giro inicial no está en un estado puro de subida o bajada, sino en alguna superposición de ambos. La buena noticia es que ya sabemos todo lo que necesitamos. Las reglas de la mecánica cuántica son claras: si se sabe cómo evoluciona el sistema a partir de dos estados diferentes, la evolución de una superposición de ambos estados será sólo una superposición de las dos evoluciones. En otras palabras, a partir de un giro en alguna superposición y el dispositivo de medición en su estado listo, tenemos:



El estado final ahora es una superposición enmarañada: el giro está arriba y se midió para estar arriba, además el giro está abajo y se midió para estar abajo. En este punto no es estrictamente correcto decir "el spin está en superposición" o "el aparato está en superposición". El enredo nos impide hablar de la función de onda del spin, o la del aparato, individualmente, porque lo que observaremos sobre uno puede depender de lo que observemos sobre el otro. Lo único que podemos decir es "el sistema spin+aparato está en superposición".

Este estado final es la clara, inequívoca y definitiva función de onda final para el sistema combinado de spin+aparato, si todo lo que hacemos es evolucionarlo según la ecuación de Schrödinger. Este es el secreto de la mecánica cuántica de Everet. La ecuación de Schrödinger dice que un aparato de medición preciso evolucionará en una superposición macroscópica, que finalmente interpretaremos como una ramificación en mundos separados. No pusimos los mundos dentro; siempre estuvieron ahí, y la ecuación de Schrödinger inevitablemente les da vida. El problema es que nunca parece que nos encontremos con superposiciones que impliquen grandes objetos macroscópicos en nuestra experiencia del mundo.

El remedio tradicional ha sido el mono con las reglas fundamentales de la mecánica cuántica de una manera u otra. Algunos enfoques dicen que la ecuación de Schrödinger no siempre es aplicable, otros dicen que hay variables adicionales a la función de onda. El enfoque de Copenhague consiste en no permitir el tratamiento del aparato de medición como sistema cuántico en primer lugar, y tratar el colapso de la función de onda como una forma separada en que el estado cuántico puede evolucionar. De una forma u otra, todos estos enfoques invocan las contorsiones para no aceptar superposiciones como la escrita anteriormente como la verdadera y completa descripción de la naturaleza. Como Everett diría más tarde, "La Interpretación de Copenhague es irremediablemente incompleta debido a su dependencia a *priori de la* física clásica... así como una monstruosidad filosófica con un concepto de 'realidad' para el mundo macroscópico y la negación del mismo para el microcosmos".

La receta de Everett era simple: deja de hacerte un aborto. Acepta la realidad de lo que predice la ecuación de Schrödinger. Ambas partes de la función de la onda final están realmente allí. Simplemente describen mundos separados, que no interactúan nunca más.

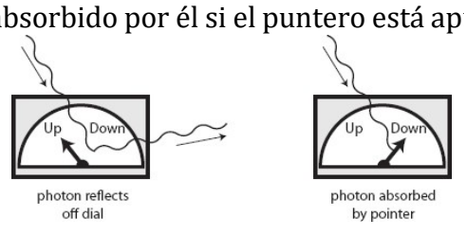
Everett no introdujo nada nuevo en la mecánica cuántica; eliminó algunas piezas extrañas del formalismo. Cada versión no vegetariana de la mecánica cuántica es, como el físico Ted Bunn ha dicho, una teoría de "mundos en desaparición". Si los mundos múltiples te molestan, tienes que jugar con la naturaleza de los estados cuánticos o su evolución ordinaria para deshacerte de ellos. ¿Vale la pena?

Hay una pregunta inminente aquí. Estamos familiarizados con la forma en que las funciones de onda representan superposiciones de diferentes resultados de medición posibles. La función de onda de un electrón puede ponerlo en una superposición de varios lugares posibles, así como en una superposición de spin-up y spin-down. Pero nunca estuvimos tentados de decir que cada parte de la superposición era un "mundo" separado. De hecho, habría sido incoherente hacerlo. Un electrón que está en un estado de spin-up puro con respecto al eje vertical está en una superposición de spin-up y spin-down con respecto al eje horizontal. Entonces, ¿eso describe un mundo, o dos?

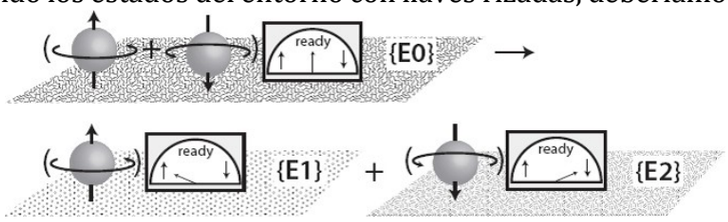
Everett sugirió que es lógicamente consistente pensar que las superposiciones que involucran objetos macroscópicos describen mundos separados. Pero en el momento en que escribía, los físicos aún no habían desarrollado las herramientas técnicas necesarias para convertir esto en un cuadro completo. Esa comprensión sólo llegó más tarde, con la apreciación de un fenómeno conocido como *decoherencia*. Introducida en 1970 por el físico alemán Hans Dieter Zeh, la idea de la decoherencia se ha convertido en una parte central de cómo los físicos piensan sobre la dinámica cuántica. Para el moderno Everettiano, la decoherencia es absolutamente crucial para dar sentido a la mecánica cuántica. Explica de una vez por todas por qué las funciones de las ondas parecen colapsar cuando se miden los sistemas cuánticos y, de hecho, qué es realmente una "medición".

Sabemos que sólo hay una función de onda, la función de onda del universo. Pero cuando hablamos de partículas microscópicas individuales, pueden establecerse en estados cuánticos donde se desenredan del resto del mundo. En ese caso, podemos hablar sensatamente de "la función de onda de este electrón en particular" y así sucesivamente, teniendo en cuenta que en realidad es sólo un atajo útil que podemos emplear cuando los sistemas se desenredan con cualquier otra cosa.

Con los objetos macroscópicos, las cosas no son tan simples. Consideremos nuestro aparato de medición de espinazo, e imaginemos que lo ponemos en una superposición de haber medido espinazo arriba y espinazo abajo. El dial del aparato incluye un puntero que apunta hacia arriba o hacia abajo. Un aparato como ese no se mantiene separado del resto del mundo. Incluso si parece que sólo está sentado allí, en realidad las moléculas de aire en la habitación están chocando constantemente con él, los fotones de luz rebotan en él, y así sucesivamente. Llama a todas esas otras cosas -el resto del universo- el *medio ambiente*. En situaciones ordinarias, no hay manera de evitar que un objeto macroscópico interactúe con su entorno, aunque sea muy suavemente. Tales interacciones harán que el aparato se enrede con el entorno, por ejemplo, porque un fotón se reflejaría en el dial si el puntero está en una posición, pero sería absorbido por él si el puntero está apuntando a otro lugar.



Así que la función de onda que escribimos arriba, donde un aparato se enredó con un qubit, no era toda la historia. Poniendo los estados del entorno con llaves rizadas, deberíamos haber escrito



En realidad no importa lo que los estados del medio ambiente son, así que los hemos retratado como diferentes fondos etiquetados como {E0}, {E1}, y {E2}. No llevamos (y generalmente no podemos) la cuenta de lo que pasa exactamente en el ambiente, es demasiado complicado. No va a ser un solo fotón que interactúe de forma diferente con las diferentes partes de la función de onda del aparato, será un gran número de ellos. No se puede esperar que nadie haga un seguimiento de cada fotón o partícula en una habitación.

Ese simple proceso - los objetos microscópicos se enredan con el medio ambiente, que no podemos rastrear - es una decoherencia, y viene con consecuencias que alteran el universo. La decoherencia hace que la función de onda se divida, o *se ramifique*, en múltiples mundos. Cualquier observador se ramifica en múltiples copias junto con el resto del universo. Después de ramificarse, cada copia del observador original se encuentra en un mundo con algún resultado de medición particular. Para ellos, la función de onda *parece* haber colapsado. Sabemos que el colapso es sólo aparente, debido a la decoherencia que divide la función de onda.

No sabemos con qué frecuencia se producen las ramificaciones, o incluso si es una pregunta sensata. Depende de si hay un número finito o infinito de grados de libertad en el universo, lo cual es actualmente una pregunta sin respuesta en la física fundamental. Pero sabemos que hay muchas ramificaciones; ocurre cada vez que un sistema cuántico en una superposición se enreda con el medio ambiente. En un cuerpo humano típico, alrededor de 5.000 átomos sufren una desintegración radiactiva cada segundo. Si cada desintegración ramifica la función de la onda en dos, son $^{25.000}$ nuevas ramas cada segundo. Es mucho.

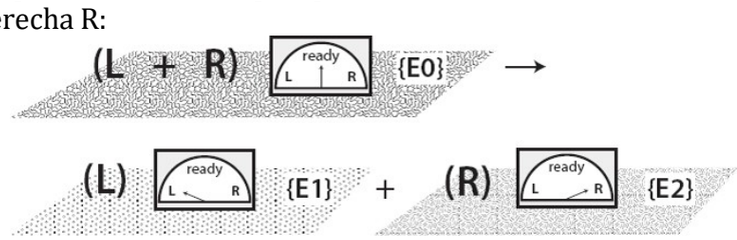
¿Qué hace un "mundo", de todos modos? Acabamos de escribir un único estado cuántico que describe un giro, un aparato y un entorno. ¿Qué nos hace decir que describe dos mundos, en lugar de uno solo?

Una cosa que te gustaría tener en un mundo es que las diferentes partes del mismo pueden, al menos en principio, afectarse mutuamente. Considere el siguiente escenario del "mundo de los fantasmas" (no se trata de una verdadera descripción de la realidad, sino de una analogía colorida): cuando los seres vivos mueren, todos se convierten en fantasmas. Estos fantasmas pueden verse y hablar entre ellos, pero no pueden vernos ni hablarnos, ni nosotros podemos verlos ni hablar con ellos. Viven en una Tierra Fantasma separada, donde pueden construir casas fantasma e ir a sus trabajos fantasmas. Pero ni ellos ni sus alrededores pueden interactuar con nosotros y las cosas que nos rodean de ninguna manera. En este caso tiene sentido decir que los fantasmas habitan un mundo fantasma realmente separado, por la razón fundamental de que lo que sucede en el mundo fantasma no tiene absolutamente ninguna relación con lo que sucede en nuestro mundo.

Ahora aplica este criterio a la mecánica cuántica. No nos interesa si el espín y su aparato de medición pueden influenciarse mutuamente, obviamente pueden. Lo que nos interesa es si un componente de, digamos, la función de onda del aparato (por ejemplo, la pieza donde el dial está apuntando hacia Arriba) puede posiblemente influir en otra pieza (por ejemplo, donde está apuntando hacia Abajo). Anteriormente nos hemos encontrado con una situación como ésta, en la que la función de onda se influye a sí misma, en el fenómeno de interferencia del experimento de la doble rendija. Cuando los electrones por dos rendijas sin medir por cuál de ellas pasaron, vimos bandas de interferencia en la pantalla final, y las atribuimos a la cancelación entre la contribución a la probabilidad total de cada una de las dos rendijas. Crucialmente, asumimos implícitamente que el electrón no interactuó y se enredó con nada a lo largo de su viaje; no se descohizo.

Cuando en cambio detectamos por qué ranura pasó el electrón, las bandas de interferencia desaparecieron. En ese momento atribuimos esto al hecho de que se había realizado una medición, colapsando la función de onda del electrón en una u otra rendija. Everett nos da una historia mucho más convincente que contar.

Lo que realmente ocurrió fue que el electrón se enredó con el detector al pasar por las rendijas, y luego el detector se enredó rápidamente con el entorno. El proceso es precisamente análogo a lo que sucedió con nuestro espín de arriba, excepto que estamos midiendo si el electrón pasó por la rendija izquierda L o por la derecha R:



Ningún colapso misterioso; toda la función de onda sigue ahí, evolucionando alegremente según la ecuación de Schrödinger, dejándonos en una superposición de dos piezas enmarañadas. Pero noten lo que sucede a medida que el electrón continúa hacia la pantalla. Como antes, el estado del electrón en cualquier punto dado de la pantalla recibirá una contribución de lo que pasó por la rendija L, y otra contribución de lo que pasó por la rendija R. Pero ahora esas contribuciones *no interferirán entre sí*. Para obtener interferencia, necesitamos sumar dos cantidades iguales y opuestas:

1 + (-1) = 0.

Pero no hay ningún punto en la pantalla donde encontremos contribuciones iguales y opuestas a la función de onda del electrón desde las rendijas L y R, porque al pasar por esas rendijas el electrón se enredó con *diferentes estados del resto del mundo*. Cuando decimos igual y opuesto, nos referimos precisamente a igual y opuesto, no "igual y opuesto excepto por esa cosa con la que estamos enredados". Estar enredado con diferentes estados del detector y del entorno, ser decodificado, en otras palabras, significa que las dos partes de la función de onda del electrón ya no pueden interferir entre sí. Y eso significa que no pueden interactuar en absoluto. Y eso significa que son, a todos los efectos, parte de mundos separados. Desde el punto de vista de las cosas enredadas con una rama de la función de onda, las otras ramas también podrían estar pobladas por fantasmas.

La formulación de la mecánica cuántica de Muchos Mundos elimina de una vez por todas cualquier misterio sobre el proceso de medición y el colapso de la función de onda. No necesitamos reglas especiales para hacer una observación: todo lo que sucede es que la función de onda sigue resoplando de acuerdo con la ecuación de Schrödinger. Y no hay nada especial en lo que constituye "una medición" o "un observador" - una medición es cualquier interacción que cause que un sistema cuántico se enrede con el medio ambiente, creando decoherencia y una ramificación en mundos separados, y un observador es cualquier sistema que provoque tal interacción. La conciencia, en particular, no tiene

nada que ver con esto. El "observador" podría ser una lombriz, un microscopio o una roca. No hay nada especial en los sistemas macroscópicos, aparte del hecho de que no pueden evitar interactuar y enredarse con el medio ambiente. El precio que pagamos por tan poderosa y simple unificación de la dinámica cuántica es un gran número de mundos separados.

El mismo Everett no estaba familiarizado con la decoherencia, por lo que su cuadro no era tan robusto y completo como el que hemos pintado. Pero su forma de repensar el problema de la medición y ofrecer una imagen unificada de la dinámica cuántica fue convincente desde el principio. Incluso en la física teórica, la gente a veces tiene suerte, y se topa con una idea importante más por estar en el lugar correcto en el momento adecuado que por ser particularmente brillante. Ese no es el caso de Hugh Everett; quienes lo conocieron dan testimonio de manera uniforme de sus increíbles dotes intelectuales, y de sus escritos se desprende claramente que tenía un profundo conocimiento de las implicaciones de sus ideas. Si aún viviera, se sentiría perfectamente cómodo en las discusiones modernas sobre los fundamentos de la mecánica cuántica.

Lo que fue difícil fue conseguir que otros apreciaran esas ideas, y eso incluía a su asesor. Wheeler apoyó personalmente mucho a Everett, pero también se dedicó a su propio mentor, Bohr, y estaba convencido de la solidez básica del enfoque de Copenhague. Al mismo tiempo, quería que las ideas de Everett fueran escuchadas ampliamente y que no se interpretaran como un ataque directo a la forma de pensar de Bohr sobre la mecánica cuántica.

Sin embargo, la teoría de Everett *fue* un asalto directo a la foto de Bohr. El mismo Everett lo sabía, y disfrutó ilustrando la naturaleza de este asalto en un lenguaje vívido. En un primer borrador de su tesis, Everett usó la analogía de una ameba dividiéndose para ilustrar la ramificación de la función de onda: "Uno puede imaginar una ameba inteligente con buena memoria. A medida que el tiempo avanza, la ameba se divide constantemente, cada vez las amebas resultantes tienen los mismos recuerdos que el padre. Nuestra ameba, por lo tanto, no tiene una línea de vida, sino un árbol de vida." Wheeler se desanimó por la franqueza de esta metáfora (bastante precisa), garabateando en el margen del manuscrito, "¿Dividir? Se necesitan mejores palabras". El consejero y el estudiante se peleaban constantemente sobre la mejor manera de expresar la nueva teoría, con Wheeler abogando por la precaución y la prudencia mientras que Everett favorecía la claridad audaz.

En 1956, mientras Everett trabajaba en la finalización de su tesis, Wheeler visitó Copenhague y presentó el nuevo escenario a Bohr y sus colegas, incluyendo a Aage Petersen. Intentó presentarlo de todos modos; para entonces la onda-funciones-colapso-y-no-preguntas embarazosas-sobre-exactamente-cómo la escuela de la teoría cuántica se había endurecido en la sabiduría convencional, y aquellos que la aceptaron no estaban interesados en revisar los fundamentos cuando había tanto trabajo aplicado interesante por hacer. Las cartas de Wheeler, Everett y Petersen volaron de un lado a otro del Atlántico, continuando cuando Wheeler regresó a Princeton y ayudó a Everett a elaborar la forma final de su disertación. La agonía de este proceso se refleja en la evolución del propio trabajo: El primer borrador de Everett se tituló "La mecánica cuántica por el método de la función de onda universal", y una versión revisada se llamó "La mecánica de ondas sin probabilidad". Este documento, más tarde llamado la "versión larga" de la tesis, no se publicó hasta 1973. Una "versión corta" fue finalmente presentada para el doctorado de Everett como "Sobre los fundamentos de la Mecánica Cuántica", y finalmente publicada en 1957 como "Formulación del estado relativo de la Mecánica Cuántica".

Mecánica", y finalmente publicado en 1957 como "Formulación del estado relativo de la mecánica cuántica". Omitió muchas de las secciones más jugosas que Everett había compuesto originalmente, incluyendo exámenes de los fundamentos de la probabilidad y la teoría de la información y una visión general del problema de la medición cuántica, centrándose en cambio en las aplicaciones a la cosmología cuántica. (No aparecen amebas en el artículo publicado, pero Everett se las arregló para insertar la palabra "división" en una nota al pie de página añadida como prueba mientras Wheeler no miraba). Además, Wheeler escribió un artículo de "evaluación" que se publicó junto al de Everett, en el que se sugería que la nueva teoría era radical e importante, al tiempo que se intentaba documentar sus diferencias manifiestas con el enfoque de Copenhague.

Los argumentos continuaron, sin que se hiciera mucho progreso. Vale la pena citar una carta que Everett escribió a Petersen, en la que expresa su frustración:

> Para que la discusión de mi trabajo no muera por completo, déjame echar un poco de leña al fuego con... las críticas a la "interpretación de Copenhague". . . . No creo que puedas descartar mi punto de vista como un simple malentendido de la posición de Bohr. . . . Creo que basar la mecánica cuántica en la física clásica era un paso provisional necesario, pero que ha llegado el momento... de tratar [la mecánica cuántica] por derecho propio como una teoría fundamental sin ninguna dependencia de la física clásica, y de derivar la física clásica de ella. . . .
>
> Permítanme mencionar algunas características más irritantes de la Interpretación de Copenhague. Usted habla de la masividad de los sistemas macro que permiten descuidar los efectos cuánticos adicionales (en las discusiones sobre la ruptura de la cadena de medición), pero nunca da ninguna justificación para este dogma rotundamente afirmado. [Y] no se encuentra en ninguna parte una explicación consistente para esta "irreversibilidad" del proceso de medición. Tampoco está implícita en la mecánica ondulatoria, ni en la mecánica clásica. ¿Otro postulado independiente?

Pero Everett decidió no continuar la lucha académica. Antes de terminar su doctorado, aceptó un trabajo en el Grupo de Evaluación de Sistemas de Armas del Departamento de Defensa de los EE.UU., donde estudió los efectos de las armas nucleares. Continuó investigando sobre estrategia, teoría de juegos y optimización, y participó en la creación de varias empresas nuevas. No está claro hasta qué punto la decisión consciente de Everett de no solicitar puestos de profesor estuvo motivada por las críticas a su nueva teoría, o simplemente por la impaciencia con el mundo académico en general.

Sin embargo, mantuvo el interés en la mecánica cuántica, aunque nunca volvió a publicarlo. Después de que Everett defendiera su doctorado y ya trabajara para el Pentágono, Wheeler lo persuadió para que visitara Copenhague por sí mismo y hablara con Bohr y otros. La visita no fue bien; después Everett juzgó que estaba "condenada desde el principio".

Bryce DeWitt, un físico americano que había editado la revista donde apareció la tesis de Everett, le escribió una carta quejándose de que el mundo real obviamente no se "ramificaba", ya que nunca experimentamos tales cosas. Everett respondió con una referencia a la idea igualmente atrevida de Copérnico de que la Tierra se mueve alrededor del sol, y no al revés: "No puedo resistirme a preguntar: ¿Sientes el movimiento de la Tierra?" DeWitt tuvo que admitir que fue una respuesta bastante buena. Después de meditar el asunto durante un tiempo, en 1970 DeWitt se había convertido en un entusiasta Everettiano. Puso mucho esfuerzo en empujar la teoría, que había languidecido en la oscuridad, hacia un mayor reconocimiento público. Sus estrategias incluían un influyente artículo de 1970 en *Physics Today*, seguido de una colección de ensayos de 1973 que incluía por fin la versión larga de la disertación de Everett, así como una serie de comentarios. La colección se llamó simplemente *La interpretación de la mecánica cuántica en muchos mundos,* un nombre vívido que se ha mantenido desde entonces.

En 1976, John Wheeler se retiró de Princeton y ocupó un puesto en la Universidad de Texas, donde DeWitt también era profesor. Juntos organizaron un taller en 1977 sobre la teoría de los muchos mundos, y Wheeler convenció a Everett para que se tomara un tiempo libre en su trabajo de defensa para poder asistir. La conferencia fue un éxito, y Everett causó una gran impresión en los físicos reunidos en la audiencia. Uno de ellos fue el joven investigador David Deutsch, que se convertiría en un gran defensor de muchos mundos, así como un pionero de la computación cuántica. Wheeler llegó a proponer un nuevo instituto de investigación en Santa Bárbara, donde Everett podría volver a trabajar a tiempo completo en la mecánica cuántica, pero al final no se consiguió nada.

Everett murió en 1982, a la edad de 51 años, de un repentino ataque al corazón. No había llevado un estilo de vida saludable, sobre-indulgente en la comida, el tabaco y la bebida. Su hijo, Mark Everett (que luego formaría la banda Eels), ha dicho que en un principio estaba molesto con su padre por no cuidarse mejor. Más tarde cambió de opinión: "Me doy cuenta de que hay un cierto valor en el modo de vida de mi padre. Comía, fumaba y bebía a su antojo, y un día, de repente y rápidamente, murió.

Dadas algunas de las otras elecciones que había presenciado, resulta que disfrutar y luego morir rápidamente no es tan difícil".

---

* El conjunto de todas las ramas de la función de la onda es diferente de lo que los cosmólogos a menudo llaman "el multiverso". El multiverso cosmológico es en realidad sólo un conjunto de regiones del espacio, generalmente alejadas unas de otras, donde las condiciones locales parecen muy diferentes.

7

Orden y aleatoriedad

De dónde viene la probabilidad

Un día soleado en Cambridge, Inglaterra, Elizabeth Anscombe se encontró con su maestro, Ludwig Wittgenstein. "¿Por qué la gente dice", abrió Wittgenstein en su inimitable forma, "que era natural pensar que el sol giraba alrededor de la tierra, en lugar de que la tierra girara sobre su eje?" Anscombe dio la respuesta obvia, que *parece que* el Sol gira alrededor de la Tierra. "Bueno", respondió Wittgenstein, "*¿cómo se habría visto* si la Tierra hubiera girado sobre su eje?"

Esta anécdota -recontada por la propia Anscombe, y que Tom Stoppard contó en su obra *Saltadores- es* una de las favoritas de los Everettianos. El físico Sidney Coleman solía contarla en sus conferencias, y el filósofo de la física David Wallace la usó para abrir su libro *El multiverso emergente*. Incluso tiene un parecido familiar con el comentario de Hugh Everett a Bryce DeWitt.

Es fácil ver por qué la observación es tan relevante. Cualquier persona razonable, cuando se le habla por primera vez de la imagen de Muchos Mundos, tiene una objeción inmediata y visceral: simplemente no *se siente como si* yo personalmente me dividiera en múltiples personas cada vez que se realiza una medición cuántica. Y ciertamente no parece *que haya* todo tipo de otros universos que existan paralelamente al que yo me encuentro.

Bueno, el Everettiano responde, canalizando a Wittgenstein: ¿Qué se sentiría y se vería si muchos mundos fueran verdad?

La esperanza es que la gente que vive en un universo de Everettia experimente justo lo que la gente realmente experimenta: un mundo físico que parece obedecer las reglas de la mecánica cuántica de los libros de texto con un alto grado de precisión, y que en muchas situaciones es bien aproximado por la mecánica clásica. Pero la distancia conceptual entre "una función de onda que evoluciona suavemente" y los datos experimentales que pretende explicar es bastante grande. No es obvio que la respuesta que podemos dar a la pregunta de Wittgenstein sea la que queremos. La teoría de Everett puede ser austera en su formulación, pero todavía hay una buena cantidad de trabajo por hacer para desarrollar plenamente sus implicaciones.

En este capítulo nos enfrentaremos a un gran rompecabezas para muchos mundos: el origen y la naturaleza de la probabilidad. La ecuación de Schrödinger es perfectamente determinista. ¿Por qué las probabilidades entran en absoluto, y por qué obedecen a la regla de Born: las probabilidades son iguales a las amplitudes - los números complejos que la función de onda asocia con cada posible resultado - al cuadrado? ¿Tiene sentido hablar de la probabilidad de acabar en alguna rama particular si habrá una versión futura de mí en cada rama?

En el libro de texto o en las versiones de Copenhague de la mecánica cuántica, no hay necesidad de "derivar" la regla de Born para las probabilidades. Simplemente la colocamos ahí como uno de los postulados de la teoría. ¿Por qué no podríamos hacer lo mismo en muchos mundos?

La respuesta es que aunque la regla sonaría igual en ambos casos -"las probabilidades vienen dadas por la función de onda al cuadrado"- sus significados son muy diferentes. La versión de libro de texto de la regla de Born es realmente una declaración sobre la frecuencia con la que ocurren las cosas, o la frecuencia con la que ocurrirán en el futuro. En muchos mundos no hay lugar para tal postulado adicional; sabemos exactamente lo que sucederá, sólo por la regla básica de que la función de onda siempre obedece a la ecuación de Schrödinger. La probabilidad en Muchos Mundos es necesariamente una declaración sobre lo que debemos *creer* y cómo debemos *actuar*, no sobre la frecuencia con que suceden las cosas. Y "lo que deberíamos creer" no es algo que realmente tenga cabida en los postulados de una teoría física; debería estar implícito en ellos.

Además, como veremos, no hay espacio para un postulado extra, ni necesidad de uno. Dada la estructura básica de la mecánica cuántica, la regla de los Born es natural y automática. Dado que tendemos a ver el comportamiento de la regla de Born en la naturaleza, esto debería darnos la confianza de que estamos en el camino correcto. Un marco en el que un resultado importante puede derivarse de postulados más fundamentales debería, en igualdad de condiciones, ser preferido a uno en el que se debe asumir por separado.

Si abordamos con éxito esta cuestión, habremos hecho un avance significativo para mostrar al mundo que esperaríamos ver si muchos mundos son verdaderos es el mundo que realmente vemos. Es decir, un mundo que se aproxima mucho a la física clásica, excepto por los eventos de medición

cuántica, durante los cuales la probabilidad de obtener cualquier resultado particular viene dada por la regla de Born.

La cuestión de las probabilidades se suele formular como tratando de derivar por qué las probabilidades están dadas por las amplitudes al cuadrado. Pero esa no es realmente la parte difícil. Cuadrar las amplitudes para obtener probabilidades es algo muy natural; no había ninguna preocupación de que pudiera ser la función de onda a la quinta potencia o algo así. Aprendimos eso en el capítulo cinco, cuando usamos qubits para explicar que la función de onda puede ser pensada como un vector. Ese vector es como la hipotenusa de un triángulo rectángulo, y las amplitudes individuales son como los lados más cortos de ese triángulo. La longitud de los vectores es igual a uno, y por el teorema de Pitágoras es la suma de los cuadrados de todas las amplitudes. Así que las "amplitudes al cuadrado" se ven naturalmente como probabilidades: son números positivos que suman uno.

La cuestión más profunda es por qué hay algo impredecible en la mecánica cuántica de Everet, y si es así, por qué hay alguna regla específica para asignar probabilidades. En muchos mundos, si conoces la función de la onda en un momento dado, puedes averiguar con precisión lo que va a ser en cualquier otro momento, sólo resolviendo la ecuación de Schrödinger. No hay nada de azar en ello. Entonces, ¿cómo se supone que una imagen así recupere la realidad de nuestras observaciones, donde el decaimiento de un núcleo o la medición de un espín parece irreduciblemente aleatoria?

Considere nuestro ejemplo favorito de la medición del espín de un electrón. Digamos que empezamos el electrón en una superposición igual de spin-up y spin-down con respecto al eje vertical, y lo enviamos a través de un imán de Stern-Gerlach. La mecánica cuántica de los libros de texto dice que tenemos un 50 por ciento de posibilidades de que la función de la onda colapse hasta el spin-up, y un 50 por ciento de posibilidades de que colapse hasta el spin-down. Muchos mundos, por otro lado, dicen que hay un 100 por ciento de posibilidades de que la función de onda del universo evolucione de un mundo a dos. Es cierto que en uno de esos mundos el experimentador habrá visto spin-up y en el otro habrá visto spin-down. Pero ambos mundos están indiscutiblemente *ahí*. Si la pregunta que nos hacemos es "¿Cuál es la posibilidad de que termine siendo el experimentador de la rama de spin-up de la función de onda?", no parece haber ninguna respuesta. Usted no será uno u otro experimentador; su actual yo único evolucionará, con certeza, en ambos. ¿Cómo se supone que vamos a hablar de probabilidades en una situación así?

Es una buena pregunta. Para responderla, tenemos que ponernos un poco filosóficos, y pensar en lo que realmente significa "probabilidad".

No le sorprenderá saber que hay escuelas de pensamiento que compiten en el tema de la probabilidad. Considere la posibilidad de lanzar una moneda justa. "Justo" significa que la moneda saldrá cara el 50 por ciento del tiempo y cruz el 50 por ciento del tiempo. Al menos a largo plazo, nadie se sorprende cuando lanzas una moneda dos veces y sale cruz las dos veces.

Esta advertencia de "a largo plazo" sugiere una estrategia para lo que podríamos entender por probabilidad. Por unos pocos lanzamientos de monedas, no nos sorprendería casi ningún resultado. Pero a medida que hacemos más y más, esperamos que la proporción total de cabezas se acerque al 50 por ciento. Así que tal vez podamos definir la probabilidad de obtener cabezas como la fracción de veces que realmente obtendríamos cabezas, si la moneda fuera lanzada un número infinito de veces.

Esta noción de lo que entendemos por probabilidad se denomina a veces *frecuentismo*, ya que define la probabilidad como la frecuencia relativa de una ocurrencia en un número muy grande de ensayos. Coincide bastante bien con nuestras nociones intuitivas de cómo funciona la probabilidad cuando lanzamos monedas, tiramos dados o jugamos a las cartas. Para un frecuentista, la probabilidad es una noción objetiva, ya que sólo depende de las características de la moneda (o de cualquier otro sistema del que estemos hablando), no de nosotros o de nuestro estado de conocimiento.

El frecuentismo encaja cómodamente con la imagen de libro de texto de la mecánica cuántica y la regla de los Born. Tal vez no envíes un número infinito de electrones a través de un campo magnético para medir sus giros, pero podrías enviar un número muy grande. (El experimento de Stern-Gerlach es uno de los favoritos para reproducirse en los cursos de laboratorio de las carreras de física, así que a lo largo de los años se han medido bastantes giros de esta manera). Podemos reunir suficientes

estadísticas para convencernos de que la probabilidad en la mecánica cuántica realmente es sólo la función de onda al cuadrado.

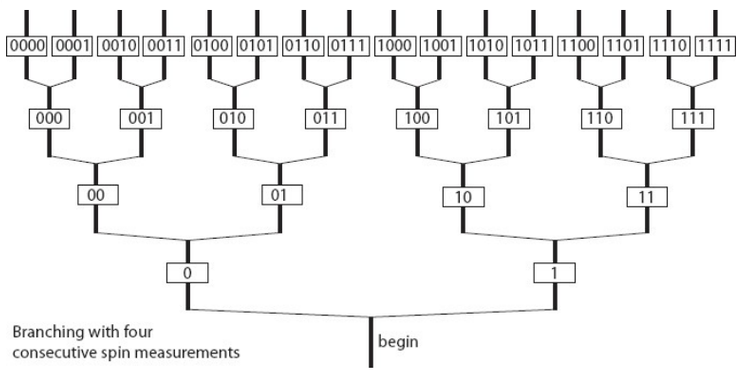
Muchos Mundos es una historia diferente. Digamos que ponemos un electrón en una superposición igual de spin-up y spin-down, medimos su spin, y luego repetimos un gran número de veces. En cada medición, la función de onda se ramifica en un mundo con un resultado de spin-up y otro con spin-down. Imagina que registramos nuestros resultados, etiquetando la rotación como "0" y la rotación como "1". Después de cincuenta mediciones, habrá un mundo en el que el registro parece

10101011111011001011001010100011101100011101000001.

Eso parece bastante aleatorio, y para obedecer a las estadísticas apropiadas: hay veinticuatro 0's, y veintiséis 1's. No exactamente cincuenta y cincuenta, pero tan cerca como deberíamos esperar.

Pero también habrá un mundo en el que cada medición devuelva la vuelta, de modo que el récord sea sólo una lista de cincuenta 0. Y un mundo en el que se observó que todas las vueltas eran descendentes, así que el récord era una lista de cincuenta 1. Y todas las demás posibles cadenas de 0 y 1. Si Everett está en lo cierto, hay una probabilidad del 100 por ciento de que cada posibilidad se realice en algún mundo en particular.

De hecho, le confesaré: realmente existen tales mundos. La cuerda de aspecto aleatorio de arriba no fue algo que inventé para que pareciera aleatorio, ni fue creada por un generador clásico de números aleatorios. En realidad fue creada por un generador de números aleatorios *cuánticos*: un aparato que hace mediciones cuánticas y las usa para generar secuencias aleatorias de 0 y 1. Según Many-Worlds, cuando generé ese número aleatorio, el universo se dividió en ^{250} copias (eso es 1.125.899.906.842.624, o aproximadamente 1 cuatrillón), cada una de las cuales lleva un número ligeramente diferente.



Si todas las copias de mí en todos esos mundos diferentes se apegaron al plan de incluir el número obtenido en el texto de este libro, eso significa que hay más de un cuatrillón de diferentes variaciones textuales de *Algo Profundamente Oculto* ahí fuera en la función de onda del universo. En su mayor parte las variaciones serán menores, sólo reordenando algunos 0 y 1. Pero algunas de esas pobres versiones de mí fueron las desafortunadas que obtuvieron todos los 0 o todos los 1. ¿Qué están pensando ahora mismo? Probablemente pensaron que el generador de números aleatorios estaba roto. Ciertamente no escribieron precisamente el texto que estoy escribiendo en este momento.

Lo que sea que yo u otras copias de mí puedan pensar sobre esta situación, es bastante diferente del paradigma de probabilidades de los frecuentadores. No tiene mucho sentido hablar de la frecuencia en el límite de un número infinito de pruebas cuando cada prueba devuelve todos los resultados, sólo en otro lugar de la función de onda. Tenemos que cambiar a otra forma de pensar acerca de lo que se supone que significa la probabilidad.

Afortunadamente, existe un enfoque alternativo de la probabilidad, y desde hace mucho tiempo es anterior a la mecánica cuántica. Esa es la noción de probabilidad *epistémica*, que tiene que ver con lo que sabemos más que con un hipotético número infinito de pruebas.

Considere la pregunta "¿Cuál es la probabilidad de que los Philadelphia 76ers ganen el Campeonato de la NBA del 2020?" (Le doy un gran valor a eso personalmente, pero los fanáticos de otros equipos pueden estar en desacuerdo.) Este no es el tipo de evento que podemos imaginarnos repetir un número infinito de veces; si no, los jugadores de baloncesto envejecerían, lo que afectaría su juego. Las Finales de la NBA del 2020 ocurrirán sólo una vez, y hay una respuesta definitiva a quién ganará,

incluso si no sabemos cuál es. Pero los profesionales de las probabilidades no tienen reparos en asignar una probabilidad a tales situaciones. Ni nosotros tampoco, en nuestra vida cotidiana; estamos constantemente juzgando la probabilidad de diferentes eventos únicos, desde conseguir un trabajo que solicitamos hasta tener hambre a las siete de la tarde. De hecho, podemos hablar de la probabilidad de eventos pasados, aunque hay algo definitivo que sucedió, simplemente porque no sabemos qué fue: "No recuerdo a qué hora salí del trabajo el jueves pasado, pero probablemente fue entre las cinco y las seis de la tarde, ya que normalmente es cuando me dirijo a casa".

Lo que hacemos en estos casos es asignar "credenciales" -grados de creencia- a las diversas proposiciones que se están considerando. Como cualquier probabilidad, las credenciales deben oscilar entre el 0 por ciento y el 100 por ciento, y su conjunto total de credenciales para los posibles resultados de un evento específico debe sumar el 100 por ciento. La credibilidad de algo puede cambiar a medida que se recopila nueva información; se puede tener cierto grado de creencia de que una palabra se deletrea de cierta manera, pero luego se va a buscar y se encuentra la respuesta correcta. Los estadísticos han formalizado este procedimiento bajo la etiqueta de *inferencia bayesiana*, en honor al Rev. Thomas Bayes, un ministro presbiteriano del siglo XVIII y matemático aficionado. Bayes derivó una ecuación que muestra cómo debemos actualizar nuestras credenciales cuando obtenemos nueva información, y puede encontrar su fórmula en carteles y camisetas en los departamentos de estadística de todo el mundo.

Así que hay una noción perfectamente buena de "probabilidad" que se aplica incluso cuando algo sólo va a suceder una vez, no un número infinito de veces. Es una noción subjetiva, más que objetiva; diferentes personas, en diferentes estados de conocimiento, podrían asignar diferentes credenciales a los mismos resultados para algún evento. Está bien, siempre que todos estén de acuerdo en seguir las reglas sobre la actualización de sus credenciales cuando aprenden algo nuevo. De hecho, si crees en el eterno -el futuro es tan real como el pasado-, pero aún no hemos llegado a él, entonces el frecuentismo está subsumido en el bayesianismo. Si lanzas una moneda al azar, la afirmación "La probabilidad de que la moneda salga cara es del 50 por ciento" puede interpretarse como "Dado lo que sé sobre esta moneda y otras monedas, lo mejor que puedo decir sobre el futuro inmediato de la moneda es que es igualmente probable que sea cara o cruz, aunque haya algo definitivo que lo sea".

Aún no es obvio que basar la probabilidad en nuestro conocimiento en lugar de en las frecuencias sea realmente un paso adelante. Muchos Mundos es una teoría determinista, y si conocemos la función de onda en un momento dado y la ecuación de Schrödinger, podemos averiguar todo lo que va a suceder. ¿En qué sentido hay algo que no sabemos, a lo que podemos asignar una credibilidad dada por la regla de Born?

Hay una respuesta tentadora pero equivocada: que no sabemos "en qué mundo terminaremos". Esto está mal porque implícitamente se basa en una noción de identidad personal que simplemente no es aplicable en un universo cuántico.

A lo que nos enfrentamos aquí es a lo que los filósofos llaman nuestra comprensión "popular" del mundo que nos rodea, y la muy diferente visión que sugiere la ciencia moderna. El punto de vista científico debería en última instancia dar cuenta de nuestras experiencias cotidianas. Pero no tenemos derecho a esperar que los conceptos y categorías que han surgido en el curso de la historia pre-científica mantengan su validez como parte de nuestra imagen más completa del mundo físico. Una buena teoría científica debería ser compatible con nuestra experiencia, pero podría hablar un lenguaje completamente diferente. Las ideas que desplegamos fácilmente en nuestra vida diaria emergen como aproximaciones útiles de ciertos aspectos de una historia más completa.

Una silla no es un objeto que participa de una esencia platónica de la sillería; es una colección de átomos dispuestos en una cierta configuración que hace sensato que la incluyamos en la categoría "silla". No tenemos problemas en reconocer que los límites de esta categoría son algo borrosos, ¿un sofá cuenta? ¿Y un taburete? Si tomamos algo que es indudablemente una silla y le quitamos los átomos uno por uno, gradualmente se vuelve cada vez menos parecido a una silla, pero no hay ningún umbral duro y rápido que cruce para saltar de repente de una silla a otra. Y eso está bien. No tenemos problemas para aceptar esta soltura en nuestro discurso diario.

Sin embargo, cuando se trata de la noción de "yo", somos un poco más protectores. En nuestra experiencia diaria, no hay nada muy borroso sobre nuestro yo. Crecemos y aprendemos, nuestro cuerpo envejece, e interactuamos con el mundo de varias maneras. Pero en un momento dado no tengo problemas para identificar a una persona específica que es innegablemente "yo mismo".

La mecánica cuántica sugiere que vamos a tener que modificar esta historia de alguna manera. Cuando se mide un giro, la función de la onda se ramifica a través de la decoherencia, un único mundo se divide en dos, y ahora hay dos personas donde yo solía ser sólo una. No tiene sentido preguntar cuál es "realmente yo". Del mismo modo, antes de que se produzca la ramificación, no tiene sentido

preguntarse en qué rama terminará el "yo". Ambos tienen todo el derecho de pensar en sí mismos como "yo".

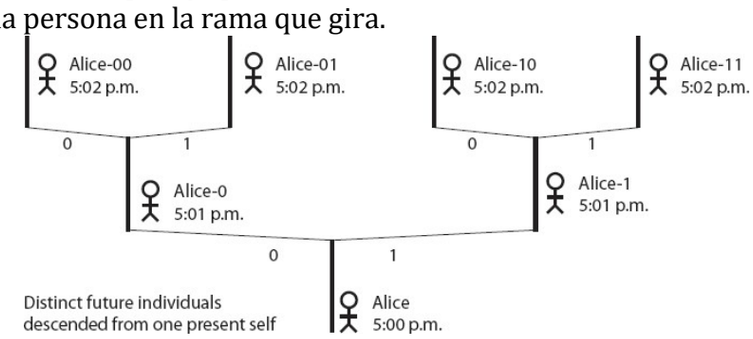
En un universo clásico, identificar a un solo individuo como una persona que envejece a través del tiempo no es generalmente problemático. En cualquier momento una persona es un cierto arreglo de átomos, pero no son los átomos individuales los que importan; en gran medida nuestros átomos son reemplazados con el tiempo. Lo que importa es el patrón que formamos, y la continuidad de ese patrón, especialmente en los recuerdos de la persona en cuestión.

La nueva característica de la mecánica cuántica es la duplicación de ese patrón cuando la función de onda se ramifica. Eso no es razón para entrar en pánico. Sólo tenemos que ajustar nuestra noción de identidad personal a través del tiempo para dar cuenta de una situación que nunca tuvimos motivos para contemplar durante los milenios de evolución humana pre-científica.

Por muy terca que sea nuestra identidad, el concepto de una sola persona que se extiende desde el nacimiento hasta la muerte siempre fue sólo una aproximación útil. La persona que eres ahora no es exactamente la misma que la que eras hace un año, o incluso hace un segundo. Tus átomos están en lugares ligeramente diferentes, y algunos de tus átomos podrían haber sido intercambiados por otros nuevos. (Si estás comiendo mientras lees, puede que tengas más átomos ahora que hace un momento). Si quisiéramos ser más precisos que de costumbre, en lugar de hablar de "tú", deberíamos hablar de "tú a las 5:00 p.m.", "tú a las 5:01 p.m.", y así sucesivamente.

La idea de un "tú" unificado es útil no porque todas estas diferentes colecciones de átomos en diferentes momentos del tiempo sean literalmente las mismas, sino porque están relacionadas entre sí de una manera obvia. Describen un patrón real. Usted en un momento dado desciende de usted en un momento anterior, a través de la evolución de los átomos individuales dentro de usted y la posible adición o sustracción de unos pocos de ellos. Los filósofos han pensado en esto, por supuesto; Derek Parfit, en particular, sugirió que la identidad a través del tiempo es una cuestión de una instancia en su vida "de pie en la Relación R" a otra instancia, donde la Relación R dice que su yo futuro comparte la continuidad psicológica con su yo pasado.

La situación en la mecánica cuántica de muchos mundos es exactamente la misma, excepto que ahora más de una persona puede descender de una sola persona anterior. (Parfit no habría tenido ningún problema con eso, y de hecho investigó situaciones análogas con máquinas duplicadoras). En lugar de hablar de "usted a las 5:01 p.m.", tenemos que hablar de "la persona a las 5:01 p.m. que descendió de usted a las 5:00 p.m. y que terminó en la rama de la función de onda que gira", y de la misma manera para la persona en la rama que gira.



Cada una de esas personas tiene un reclamo razonable de ser "tú". Ninguno de ellos está equivocado. Cada uno de ellos es una persona separada, todos ellos remontan sus comienzos a la misma persona. En muchos mundos, la duración de la vida de una persona debe ser pensada como un árbol ramificado, con múltiples individuos en un momento dado, en lugar de una sola trayectoria, como una ameba que se divide. Y nada de esta discusión realmente depende de lo que estamos hablando de ser una persona en lugar de una roca. El mundo se duplica, y todo dentro del mundo va junto con él.

Ahora estamos preparados para enfrentarnos a este problema de probabilidades en muchos mundos. Podría haber parecido natural pensar que la pregunta adecuada es "¿En qué rama terminaré?" Pero no es así como deberíamos pensar en ello.

Piense en el momento inmediatamente después de que la decoherencia haya ocurrido y el mundo se haya ramificado. La decoherencia es un proceso extraordinariamente rápido, que generalmente toma una pequeña fracción de segundo en suceder. Desde una perspectiva humana, la función de onda

se ramifica esencialmente de forma instantánea (aunque eso es sólo una aproximación). Así que la ramificación ocurre primero, y sólo nos enteramos de ello un poco más tarde, por ejemplo, mirando si el electrón subió o bajó cuando pasó por el campo magnético.

Por un breve momento, entonces, hay dos copias de usted, y esas dos copias son precisamente idénticas. Cada una de ellas vive en una rama distinta de la función de onda, pero ninguna de ellas sabe en cuál está.

Puedes ver a dónde va esto. No hay nada desconocido sobre la función de onda del universo, contiene dos ramas, y sabemos la amplitud asociada a cada una de ellas. Pero hay algo que la gente real de estas ramas no sabe: en qué rama están. Esta situación, enfatizada por primera vez en el contexto cuántico por el físico Lev Vaidman, se llama incertidumbre *auto-localizable: sabes* todo lo que hay que saber sobre el universo, excepto dónde estás dentro de él.

Esa ignorancia nos da la oportunidad de hablar de probabilidades. En ese momento después de la ramificación, ambas copias de ustedes están sujetas a la incertidumbre de auto-localización, ya que no saben en qué rama están. Lo que pueden hacer es asignar un crédito a estar en una rama o en la otra.

¿Cuál debería ser esa credibilidad? Hay dos formas plausibles de hacerlo. Una es que podemos usar la estructura de la propia mecánica cuántica para elegir un conjunto preferido de credenciales que los observadores racionales deberían asignar a estar en varias ramas. Si estás dispuesto a aceptar eso, las credenciales que terminarás asignando son exactamente las que obtendrías de la regla de Born. El hecho de que la probabilidad de un resultado de medición cuántica venga dada por la función de onda al cuadrado es justo lo que esperaríamos si esa probabilidad surgiera de las credenciales asignadas en condiciones de incertidumbre auto-localizada. (Y si estás dispuesto a aceptarlo y no quieres que te molesten los detalles, eres bienvenido a saltarte el resto de este capítulo).

Pero hay otra escuela de pensamiento, que básicamente niega que tenga sentido asignar alguna creencia definitiva. Puedo inventar todo tipo de reglas extravagantes para calcular probabilidades de estar en una rama de la función de onda u otra. Tal vez asigno una mayor probabilidad de estar en una rama donde soy más feliz, o donde los giros están siempre apuntando hacia arriba. El filósofo David Albert ha sugerido (sólo para resaltar la arbitrariedad, no porque piense que es razonable) una "medida de gordura", donde la probabilidad es proporcional al número de átomos en tu cuerpo. No hay justificación razonable para hacerlo, pero ¿quién me lo impide? La única cosa "racional" que se puede hacer, de acuerdo con esta actitud, es admitir que no hay una forma correcta de asignar credenciales, y por lo tanto negarse a hacerlo.

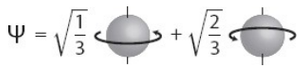
Esa es una posición que uno puede tomar, pero no creo que sea la mejor. Si Muchos Mundos es correcto, nos encontraremos en situaciones de incertidumbre auto-localizada nos guste o no. Y si nuestro objetivo es llegar a la mejor comprensión científica del mundo, esa comprensión implicará necesariamente una asignación de credenciales en estas situaciones. Después de todo, parte de la ciencia es predecir lo que se observará, aunque sólo sea de forma probabilística. Si hubiera una colección arbitraria de formas de asignar credenciales, y cada una de ellas pareciera tan razonable como la otra, estaríamos atascados. Pero si la estructura de la teoría apunta inequívocamente a una forma particular de asignar tales credenciales, y esa forma está de acuerdo con nuestros datos experimentales, deberíamos adoptarla, felicitarnos por un trabajo bien hecho, y pasar a otros problemas.

Digamos que nos creemos la idea de que podría haber una forma claramente mejor de asignar credenciales cuando no sabemos en qué rama de la función de onda estamos. Antes mencionamos que, en el fondo, la regla de Born es sólo el teorema de Pitágoras en acción. Ahora podemos ser un poco más cuidadosos y explicar por qué es la forma racional de pensar en las credenciales en presencia de la incertidumbre auto-localizada.

Esta es una pregunta importante, porque si no conociéramos ya la regla de Born, podríamos pensar que las amplitudes son completamente irrelevantes para las probabilidades. Cuando se pasa de una rama a dos, por ejemplo, ¿por qué no asignar una probabilidad igual a cada una, ya que son dos universos separados? Es fácil mostrar que esta idea, conocida como recuento *de ramas*, no puede funcionar. Pero hay una versión más restringida, que dice que debemos asignar iguales probabilidades a las ramas *cuando tienen la misma amplitud*. Y eso, maravillosamente, resulta ser todo lo que necesitamos para mostrar que cuando las ramas tienen diferentes amplitudes, debemos usar la regla de Born.

Primero despachemos la idea equivocada del recuento de ramas antes de pasar a la estrategia que realmente funciona. Consideremos un solo electrón cuyo espín vertical ha sido medido por un aparato,

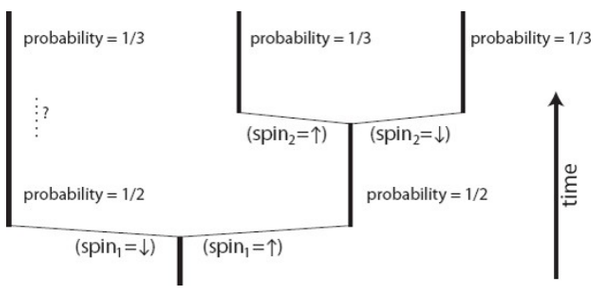
de modo que se ha producido la decoherencia y la ramificación. Estrictamente hablando, deberíamos llevar la cuenta de los estados del aparato, del observador y del ambiente, pero ellos sólo van por el camino, así que no los escribiremos explícitamente. Imaginemos que las amplitudes para el spin-up y el spin-down no son iguales, sino que tenemos un estado desequilibrado Ψ, con amplitudes desiguales para las dos direcciones.



Esos números fuera de las diferentes ramas son las amplitudes correspondientes. Como la regla de Born dice que la probabilidad es igual a la amplitud al cuadrado, en este ejemplo deberíamos tener una probabilidad de 1/3 de ver el spin-up y una probabilidad de 2/3 de ver el spin-down.

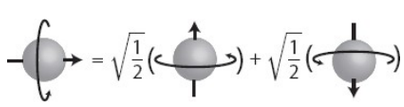
Imagina que no sabíamos de la regla de los Born, y que estábamos tentados de asignar probabilidades por un simple conteo de ramas. Piensa en el punto de vista de los observadores de las dos ramas. Desde su perspectiva, esas amplitudes son sólo números invisibles que multiplican su rama en la función de onda del universo. ¿Por qué deberían tener algo que ver con las probabilidades? Ambos observadores son igualmente reales, y ni siquiera saben en qué rama están hasta que miran. ¿No sería más racional, o al menos más democrático, asignarles credenciales iguales?

El problema obvio es que se nos permite seguir midiendo cosas. Imagina que acordamos de antemano que si medíamos el spin-up, nos detendríamos ahí, pero si medíamos el spin-down, un mecanismo automático mediría rápidamente otro spin. Este segundo giro está en un estado de giro-derecha, que sabemos que puede escribirse como una superposición de giro-arriba y giro-abajo. Una vez que lo hemos medido (sólo en la rama en la que el primer giro fue hacia abajo), tenemos tres ramas: una en la que el primer giro fue hacia arriba, otra en la que bajamos y luego subimos, y otra en la que bajamos dos veces seguidas. La regla de "asignar igual probabilidad a cada rama" nos diría que asignáramos una probabilidad de 1/3 a cada una de estas posibilidades.



Eso es una tontería. Si siguiéramos esa regla, la probabilidad de la rama de spin-up original cambiaría repentinamente cuando hiciéramos una medición en la rama de spin-down, pasando de 1/2 a 1/3. La probabilidad de observar el spin-up en nuestro experimento inicial no debería depender de si alguien en una rama completamente separada decide hacer otro experimento más adelante. Así que si vamos a asignar credenciales de una manera sensata, tendremos que ser un poco más sofisticados que el simple conteo de ramas.

En lugar de decir simplísticamente "Asignar igual probabilidad a cada rama", intentemos algo de alcance más limitado: "Asignar igual probabilidad a las ramas cuando tienen igual amplitud". Por ejemplo, un solo giro en un estado de giro-derecha puede escribirse como una superposición igual de giro-arriba y giro-abajo.

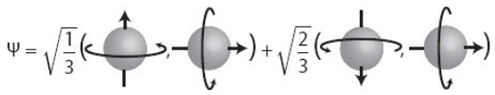


Esta nueva regla dice que debemos dar el 50 por ciento de credibilidad a estar en las ramas que giran hacia arriba o hacia abajo, si observamos el giro a lo largo del eje vertical. Esto parece razonable, ya que hay una simetría entre las dos opciones; en realidad, cualquier regla razonable debería asignarles igual probabilidad. *

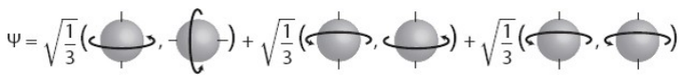
Lo bueno de esta propuesta más modesta es que no se produce ninguna inconsistencia con las mediciones repetidas. Hacer una medición extra en una rama pero no en la otra nos dejaría con ramas que tienen amplitudes desiguales de nuevo, así que la regla parece no decir nada en absoluto.

Pero de hecho es mucho mejor que eso. Si empezamos con esta simple regla de igualdad de probabilidades, y preguntamos si es un caso especial de una regla más general que nunca lleva a inconsistencias, terminamos con una respuesta única. Y esa respuesta es la regla de Born: la probabilidad es igual a la amplitud al cuadrado.

Podemos ver esto volviendo a nuestro caso desequilibrado, con una amplitud igual a la raíz cuadrada de 1/3 y la otra igual a la raíz cuadrada de 2/3. Esta vez incluiremos explícitamente un segundo qubit de giro horizontal derecho desde el principio. Al principio, este segundo qubit sólo va a lo largo del paseo.



Insistir en la igualdad de probabilidades para amplitudes iguales no nos dice nada todavía, ya que las amplitudes no son iguales. Pero podemos jugar el mismo juego que antes, midiendo el segundo giro a lo largo del eje vertical si el primer giro es hacia abajo. La función de onda evoluciona en tres componentes, y podemos averiguar cuáles son sus amplitudes mirando la descomposición de un estado de spin-derecha en giros verticales arriba. Multiplicando la raíz cuadrada de 2/3 por la raíz cuadrada de 1/2 da la raíz cuadrada de 1/3, así que obtenemos tres ramas, todas con amplitudes iguales.



Como las amplitudes son iguales, ahora podemos asignarles con seguridad probabilidades iguales. Ya que hay tres de ellas, eso es 1/3 cada una. Y si no queremos que la probabilidad de una rama cambie repentinamente cuando algo ocurre en otra rama, eso significa que deberíamos haber asignado una probabilidad de 1/3 a la rama de la espina dorsal incluso antes de hacer la segunda medición. Pero 1/3 es sólo el cuadrado de la amplitud de esa rama, exactamente como la regla de Born lo predeciría.

Hay un par de preocupaciones persistentes aquí. Puede objetar que consideramos un ejemplo especialmente simple, donde una probabilidad era exactamente el doble de la otra. Pero la misma estrategia funciona siempre que podemos subdividir nuestros estados en el número correcto de términos para que todas las amplitudes sean iguales en magnitud. Eso funciona siempre que las amplitudes al cuadrado son todas números racionales (un número entero dividido por otro), y la respuesta es la misma: la probabilidad es igual a la amplitud al cuadrado. Hay un montón de números irracionales por ahí, pero como físico si eres capaz de demostrar que algo funciona para todos los números racionales, le das el problema a un matemático, murmuras algo sobre la "continuidad", y declaras que tu trabajo aquí está hecho.

Podemos ver el teorema de Pitágoras en funcionamiento. Es la razón por la que una rama que es más grande que otra por la raíz cuadrada de dos puede dividirse en dos ramas de igual tamaño que la otra. Por eso la parte difícil no es derivar la fórmula real, sino proporcionar una base sólida para lo que significa la probabilidad en una teoría determinista. Aquí hemos explorado una posible respuesta: proviene de las credenciales que tenemos por estar en diferentes ramas de la función de onda inmediatamente después de las ramas de la función de onda.

Puede que te preocupes, pero quiero saber cuál será la probabilidad de obtener un resultado incluso antes de hacer la medición, no sólo después. Antes de la ramificación, no hay incertidumbre sobre nada... Ya me has dicho que no está bien preguntarse en qué rama voy a terminar. Entonces, ¿cómo hablo de probabilidades antes de que se haga la medición?"

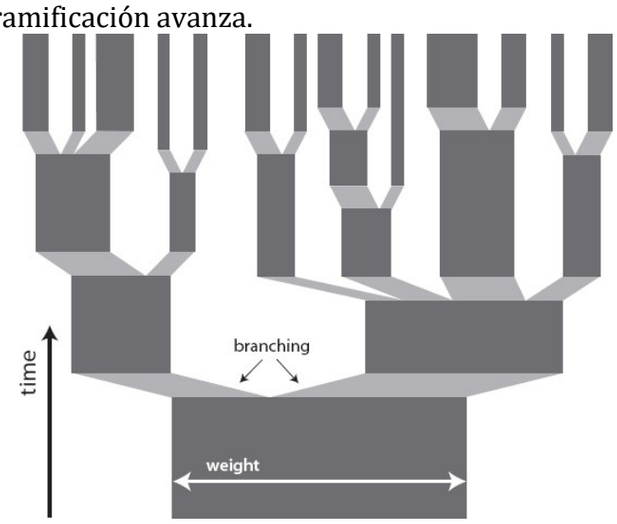
No tengas miedo. Tienes razón, interlocutor imaginario, no tiene sentido preocuparse por la rama en la que vas a terminar. Más bien, sabemos con certeza que habrá dos descendientes de tu estado actual, y cada uno de ellos estará en una rama diferente. Serán idénticos, y no estarán seguros de en qué rama están, y deberán asignar las credenciales dadas por la regla de los Born. Pero eso significa que todos tus descendientes estarán exactamente en la misma posición epistémica, asignando

probabilidades de la regla de Born. Así que tiene sentido que vayas y asignes esas probabilidades ahora mismo. Nos hemos visto obligados a cambiar el significado de lo que es la probabilidad de un simple modelo de frecuentación a un cuadro epistémico más robusto, pero cómo calculamos las cosas y cómo actuamos en base a esos cálculos pasa exactamente por lo mismo que antes. Por eso los físicos han sido capaces de hacer un trabajo interesante evitando estas sutiles preguntas todo este tiempo.

Intuitivamente, este análisis sugiere que las amplitudes en una función de onda cuántica conducen a que las diferentes ramas tengan un "peso" diferente, que es proporcional a la amplitud al cuadrado. No me gustaría tomar esa imagen mental demasiado literalmente, pero proporciona una imagen concreta que nos ayuda a dar sentido a las probabilidades, así como a otros temas como la conservación de la energía de la que hablaremos más adelante.

Peso de una rama = |Amplitud de esa rama|2

Cuando hay dos ramas de amplitudes desiguales, decimos que sólo hay dos mundos, pero no tienen el mismo peso; el de mayor amplitud cuenta más. Los pesos de todas las ramas de una función de onda en particular siempre suman uno. Y cuando una rama se divide en dos, no "hacemos más universo" simplemente duplicando el existente; el peso total de los dos nuevos mundos es igual al del único mundo con el que empezamos, y el peso total sigue siendo el mismo. Los mundos se hacen más delgados a medida que la ramificación avanza.



Esta no es la única manera de derivar la regla de los Nacidos en la teoría de muchos mundos. Una estrategia que es aún más popular en la comunidad de los fundamentos de la física apela a la teoría de la decisión, las reglas por las que un agente racional toma decisiones en un mundo incierto. Este enfoque fue iniciado en 1999 por David Deutsch (uno de los físicos que había sido impresionado por Hugh Everett en la reunión de Texas en 1977), y más tarde se hizo más riguroso por David Wallace.

La teoría de la decisión postula que los agentes racionales atribuyen diferentes cantidades de valor, o "utilidad", a las diferentes cosas que pueden suceder, y luego prefieren maximizar la cantidad de utilidad esperada, es decir, el promedio de todos los resultados posibles, ponderados por sus probabilidades. Dados dos resultados *A* y *B*, un agente que asigne exactamente el doble de utilidad a *B* que a *A debería* ser indiferente entre que *A ocurra* con certeza y que *B ocurra* con un 50% de probabilidad. Hay un montón de axiomas de sonido razonable que cualquier buena asignación de utilidades debe obedecer; por ejemplo, si un agente prefiere *A* a *B* y también prefiere *B* a *C*, definitivamente debe preferir *A* a *C*. Cualquiera que pase por la vida violando los axiomas de la teoría de la decisión se considera irracional, y eso es todo.

Para usar este marco en el contexto de Muchos Mundos, nos preguntamos cómo debe comportarse un agente racional, sabiendo que la función de onda del universo estaba a punto de ramificarse y sabiendo cuáles serían las amplitudes de las diferentes ramas. Por ejemplo, un electrón en una superposición igual de spin-up y spin-down va a viajar a través de un imán de Stern-Gerlach y hacer que se mida su spin. Alguien ofrece pagarle 2 dólares si el resultado es spin-up, pero sólo si promete pagarle 1 dólar si el resultado es spin-down. ¿Deberías aceptar la oferta? Si confiamos en la regla de Born, la respuesta es obviamente sí, ya que nuestro pago esperado es 0.5($2) + 0.5(-$1) = $0.50. Pero estamos tratando de derivar la regla de los Born aquí; ¿cómo se supone que vas a encontrar una

respuesta sabiendo que uno de tus futuros yos será 2 dólares más rico pero otro será 1 dólar más pobre? (Asumamos que eres lo suficientemente rico como para ganar o perder un dólar es algo que te importa, pero que no te cambia la vida).

Las manipulaciones son más complicadas aquí que en el caso anterior en el que explicábamos las probabilidades como credenciales en una situación de incertidumbre auto-localizada, por lo que no las revisaremos explícitamente, pero la idea básica es la misma. Primero consideramos un caso en el que las amplitudes en dos ramas diferentes son iguales, y mostramos que es racional calcular su valor esperado como la media simple de las dos utilidades diferentes. Luego supongamos que tenemos un estado desequilibrado como el de Ψ arriba, y te pido que me des un dólar si el giro se mide para estar arriba y prometo darte un dólar si el giro está abajo. Con un poco de prestidigitación matemática, podemos mostrar que su utilidad esperada en esta situación es exactamente la misma que si hubiera tres resultados posibles con amplitudes iguales, de tal manera que usted me da $1 por un resultado y yo le doy $1 por los otros dos. En ese caso, el valor esperado es el promedio de los tres resultados diferentes.

A fin de cuentas, un agente racional en un universo de Everet actúa precisamente *como si viviera* en un universo no determinístico donde las probabilidades vienen dadas por la regla de Born. Actuar de otra manera sería irracional, si aceptamos los diversos axiomas de apariencia plausible sobre lo que significa ser racional en este contexto.

Uno podría sostener tercamente que no es suficiente para mostrar que la gente debería actuar "como si" algo fuera cierto; tiene que ser realmente cierto. Eso es perderse un poco el punto. La mecánica cuántica de muchos mundos nos presenta una visión dramáticamente diferente de la realidad que la de un mundo ordinario con eventos verdaderamente aleatorios. No es de extrañar que algunas de nuestras nociones más naturales vayan a tener que cambiar con ella. Si viviéramos en el mundo de la mecánica cuántica de libro de texto, donde el colapso de las funciones de onda es verdaderamente aleatorio y obedece a la regla de Born, sería racional calcular nuestra utilidad esperada de una cierta manera. Deutsch y Wallace han demostrado que si vivimos en un universo determinista de muchos mundos, es racional calcular nuestra utilidad esperada exactamente de la misma manera. Desde esta perspectiva, eso es lo que significa hablar de probabilidad: las probabilidades de que diferentes eventos ocurran realmente son equivalentes a la ponderación que damos a esos eventos cuando calculamos nuestra utilidad esperada. Deberíamos actuar exactamente como si las probabilidades que estamos calculando se aplicaran a un único universo de azar; pero siguen siendo probabilidades reales, aunque el universo sea un poco más rico que eso.

---

* Hay argumentos más sofisticados de que tal regla se desprende de supuestos muy débiles. Wojciech Zurek ha propuesto una forma de derivar tal principio, y Charles Sebens y yo presentamos un argumento independiente. Demostramos que esta regla se puede derivar insistiendo en que las probabilidades que se asignen para hacer un experimento en su laboratorio deben ser independientes del estado cuántico en cualquier otra parte del universo.

8

¿Este compromiso ontológico me hace parecer gorda?

Un diálogo socrático sobre los rompecabezas cuánticos

Alice reflexionó en silencio durante un rato mientras rellenaba su copa de vino. "Déjame ver si entendí bien", dijo al final. "¿Realmente quieres hablar de los fundamentos de la mecánica cuántica?"

"Claro", respondió su padre con una sonrisa maliciosa. Él mismo era un físico, que había hecho una exitosa carrera como maestro de imponentes cálculos técnicos en la física de partículas. Los experimentadores que rompieron las partículas en el Gran Colisionador de Hadrones le consultaban regularmente sobre preguntas difíciles acerca de los chorros de partículas creados por los quarks superiores en descomposición. Pero cuando se trataba de la mecánica cuántica, él era un usuario, no un productor. "Ya es hora de que comprenda mejor la investigación de mi hija".

"Bien", respondió. En la escuela de postgrado, Alice había comenzado una carrera similar a la de su padre, pero se había desviado por una obstinada insistencia en darle sentido a lo que la mecánica cuántica estaba diciendo. Le parecía que los físicos se engañaban a sí mismos ignorando los fundamentos de su teoría más importante. Unos años más tarde, tenía un doctorado en física teórica pero había conseguido un trabajo como profesora asistente en el departamento de filosofía de una universidad importante, y se estaba ganando una reputación como experta en el enfoque de muchos mundos de la mecánica cuántica. "¿Cómo quieres hacer esto?"

"Escribí algunas preguntas", dijo mientras sacaba su teléfono y ponía algo en la pantalla.

Alice sintió una mezcla de curiosidad y temor. "Golpéame", dijo, oliendo el vaso de Burdeos que había servido. Se estaba abriendo bien.

"Bien", comenzó. Su propia bebida era un gin martini, no muy seco, tres aceitunas. "Empecemos con lo obvio. La navaja de Occam. A todos nos enseñan en la guardería que debemos preferir las explicaciones simples a las innecesariamente complicadas. Ahora, si sigo su trabajo en absoluto - quizás no lo hago- me parece que se siente cómodo postulando un número infinito de mundos no vistos. ¿No le parece un poco extravagante? ¿Directamente lo contrario de la explicación más simple posible?"

Alice asintió. "Bueno, depende de cómo definamos 'simple', por supuesto. Mis colegas de filosofía a veces lo consideran una preocupación sobre el 'compromiso ontológico', es decir, la cantidad de cosas que necesitamos imaginar están contenidas en toda la realidad, sólo para describir nuestra parte observada de ella."

"Entonces, ¿no sugeriría la navaja de Occam que tener demasiados compromisos ontológicos es una característica poco atractiva en una teoría fundamental?"

"Claro, pero hay que tener un poco de cuidado con lo que es ese compromiso. Muchos Mundos no *asume* un gran número de mundos. Lo que asume es una función de onda que evoluciona según la ecuación de Schrödinger. Los mundos están allí automáticamente".

Su padre se opuso. "¿Qué quieres decir con eso? Se llama literalmente la teoría de los muchos mundos. Por supuesto que asume un gran número de mundos."

"En realidad no", respondió Alicia, animándose más a medida que se acercaba al tema. "Los ingredientes utilizados en Muchos Mundos son ingredientes que se utilizan en *todas las demás versiones de la mecánica cuántica*. Para deshacerse de los otros mundos, las alternativas necesitan plantear supuestos adicionales: o bien una nueva dinámica además de la ecuación de Schrödinger, o nuevas variables además de la función de onda, o una visión totalmente separada de la realidad. Ontológicamente hablando, "Muchos Mundos" es lo más sencillo y malo que se puede conseguir".

"Estás bromeando".

"No lo soy". Una objeción mucho más respetable, para ser honesto, es que "Muchos Mundos" es demasiado pobre y mezquino, y por lo tanto es una tarea no trivial para trazar el formalismo en el desorden de nuestro mundo observado."

Su padre parecía contemplar esto. Su cóctel estaba temporalmente descuidado.

Alice decidió presionar el punto. "Le explicaré lo que quiero decir. Si crees que la mecánica cuántica dice algo sobre la realidad, crees que un electrón puede estar en una superposición de spin-up y spin-down, por ejemplo. Y como usted y yo y nuestros aparatos de medición están hechos de electrones y otras partículas cuánticas, lo más sencillo de suponer - lo que la navaja de Occam sugeriría que usted haga - es que usted y yo y nuestros aparatos de medición también pueden estar en superposiciones, y de hecho que todo el universo puede estar en superposiciones. Eso es lo que implica directamente el formalismo de la mecánica cuántica, nos guste o no. Ciertamente es posible pensar en complicar la teoría de varias maneras para deshacerse de todas esas superposiciones o hacerlas anti-físicas, pero deberíais imaginaros a Guillermo de Occam mirando por encima de vuestro hombro, con una desaprobación."

"Me parece un poco sofisticado", refunfuñó su padre. "Filosofando aparte, un montón de partes inobservables en principio de su teoría no parece muy simple en absoluto."

"Nadie puede negar que muchos mundos involucran, ya sabes, muchos mundos", admitió Alice. "Pero eso no cuenta en contra de la simplicidad de la teoría. Juzgamos las teorías no por el número de entidades que pueden describir y lo hacen, sino por la simplicidad de sus ideas subyacentes. La idea de los números enteros-'-3, -2, -1, 0, 1, 2, 3 . . .'-es mucho más simple que la idea de, no sé, '-342, 7, 91, mil millones y tres, los números primos menores de 18, y la raíz cuadrada de 3'. Hay más elementos en los números enteros, un número infinito de ellos, pero hay un patrón simple, que hace que este conjunto infinitamente grande sea fácil de describir."

"Bien", dijo su padre. "Ya lo veo. Hay muchos mundos, pero hay un principio simple que los genera, ¿verdad? Pero aún así, para cuando tengas todos esos mundos, debe ser necesaria una enorme cantidad de información matemática para describirlos. ¿No deberíamos buscar una teoría más simple en la que no se necesiten en absoluto?"

"Eres bienvenido a mirar", respondió Alice, "y la gente ciertamente lo ha hecho. Pero al deshacerse de los mundos, terminas complicando la teoría. Piénsalo de esta manera: el espacio de todas las posibles funciones de onda, el espacio de Hilbert, es muy grande. No es más grande en muchos mundos que en otras versiones de la teoría cuántica; es precisamente del mismo tamaño, y ese tamaño es más que suficiente para describir un gran número de realidades paralelas. Una vez que se pueden describir las superposiciones de electrones giratorios, se pueden describir fácilmente las superposiciones de los universos. Si estás haciendo mecánica cuántica, el potencial para muchos mundos está ahí, y la evolución ordinaria de Schrödinger tiende a hacerlos realidad, te guste o no. Otros enfoques simplemente eligen de alguna manera no hacer uso de toda la riqueza del espacio de Hilbert. No quieren aceptar la existencia de otros mundos, así que tienen que trabajar duro para deshacerse de ellos de alguna manera".

"Bien", murmuró su padre, no totalmente convencido pero aparentemente listo para pasar a la siguiente pregunta. Tomó un sorbo de su bebida y miró su teléfono. "¿No hay también un problema filosófico con la teoría? Yo no soy filósofo, pero Karl Popper y yo sabemos que una buena teoría científica se supone que es falsificable. Si no puedes imaginar un experimento que pueda probar que tu teoría está equivocada, no es realmente ciencia. Esa es exactamente la situación con todos estos otros mundos, ¿no es así?"

"Bueno, sí y no".

"Esa es la respuesta a cualquier pregunta de filosofía."

"El precio que pagamos por ser famosos por la precisión." Alice se rió. "Claro, Popper tenía esta propuesta de que las teorías científicas deben ser falsificables. Era una idea importante. Pero en el fondo de su mente pensaba en la diferencia entre teorías como la de la relatividad general de Einstein, que hacía predicciones empíricas definitivas sobre la curvatura de la luz por el sol, y aquellas como la historia marxista o el psicoanálisis freudiano. El problema con estas últimas ideas, pensó, era que no importaba lo que realmente sucediera, podías inventar una historia para explicar por qué era así."

"Eso es lo que pensé. No he leído a Popper, pero aprecio que haya puesto su dedo en algo crucial de la ciencia."

Alice asintió. "Lo hizo. Pero para ser honesto, la mayoría de los filósofos modernos de la ciencia están de acuerdo en que no es la respuesta completa. La ciencia es más complicada que eso, y lo que separa la ciencia de la no-ciencia es un asunto sutil."

"¡Todo es un asunto sutil para ustedes! No es de extrañar que nunca hagan ningún progreso."

"Ahora, ahora, papá, estamos llegando a algo importante aquí. Lo que Popper estaba tratando de señalar en última instancia es que una buena teoría científica tiene dos características. Primero, es

definitiva: no se puede torcer la teoría para "explicar" nada en absoluto, como Popper temía que se pudiera hacer con el materialismo dialéctico o el psicoanálisis. En segundo lugar, es *empírica*: las teorías no se consideran verdaderas sólo por la pura razón. Más bien, uno se imagina muchas formas posibles del mundo, cada una correspondiente a una teoría diferente, y luego uno elige entre las teorías saliendo y mirando realmente el mundo".

"Exactamente". Su padre parecía pensar que la ventaja era suya en esto. "Empírico". Pero si no puedes observar esos mundos, no hay nada realmente empírico en tu teoría."

"Au contraire", respondió Alice. "Muchos Mundos" encarna perfectamente ambas características. No es una historia tan justa que pueda ser adaptada a cualquier conjunto de hechos observados. Sus postulados son simples: el mundo está descrito por una función de onda cuántica que evoluciona según la ecuación de Schrödinger. Esos postulados son eminentemente falsificables. Basta con hacer un experimento que demuestre que la interferencia cuántica no se produce cuando debería, o que el enredo puede utilizarse realmente para la comunicación superlumínica, o que una función de onda realmente se colapsa incluso sin decoherencia. Muchos Mundos es la teoría más falsificable jamás inventada".

"Pero esas no son pruebas de muchos mundos", protestó su padre, que no quiso ceder terreno en esta. "Esas son sólo pruebas de la mecánica cuántica en general."

"¡De acuerdo! Pero la mecánica cuántica de Everet es sólo pura y austera mecánica cuántica sin ningún tipo de suposiciones adicionales ad hoc. Si quieres introducir supuestos adicionales, entonces por todos los medios podemos preguntar si esos nuevos supuestos son comprobables."

"Ven ahora. La característica que define a muchos mundos es la existencia de todos esos mundos ahí fuera. Nuestro mundo no puede interactuar con ellos, por lo que ese aspecto particular de la teoría es incuestionable."

"¿Y qué? Toda buena teoría hace algunas predicciones que son incuestionables. Nuestra actual comprensión teórica de la relatividad general predice que la fuerza de gravedad no se apagará mañana repentinamente durante un período de un milisegundo en una región particular del espacio a diez metros de ancho y a veinte millones de años luz de distancia. Esa es una predicción completamente incuestionable, por supuesto, pero mantenemos una alta credibilidad de que es verdad. No hay razón para que la gravedad se comporte de esa manera, e imaginar que lo hizo nos deja con una teoría mucho más fea que la que tenemos. Los mundos adicionales en la mecánica cuántica de Everettia tienen exactamente este carácter: son predicciones ineludibles de un simple formalismo teórico. Deberíamos aceptarlos a menos que tengamos una razón específica para no hacerlo.

"Y además", se apresuró Alice, "los otros mundos podrían ser detectados en principio, si tuviéramos una suerte increíble". No se han ido, todavía están ahí en la función de onda. La decoherencia hace que sea fantásticamente improbable que un mundo interfiera con otro, pero no es metafísicamente imposible. Sin embargo, no sugeriría solicitar una subvención para hacer tal experimento; sería como mezclar crema en el café y esperar a que se desmezclen espontáneamente".

"No te preocupes, no lo planeaba. No creo que Karl Popper esté muy contento con su enfoque de la filosofía de la ciencia."

"Te tengo ahí, papá", dijo Alice. "El mismo Popper fue un duro crítico de la interpretación de Copenhague, que llamó una 'doctrina equivocada e incluso viciosa'. En contraste, tenía cosas buenas que decir sobre muchos mundos, que describió con precisión como "una discusión completamente objetiva de la mecánica cuántica". ”

"¿En serio? ¿Popper era un Everettiano?"

"Bueno, no", admitió Alice. "Al final se separó de Everett porque no entendía por qué la función de la onda se ramificaba pero las ramas no se fusionaban después. Quiero decir, es una buena pregunta, pero es una que podemos responder".

"Estoy seguro de que puedes. ¿Dónde cayó sobre los cimientos de la mecánica cuántica?"

"Desarrolló su propia formulación de la mecánica cuántica, pero nunca se puso de moda."

"¡Ja! Filósofos."

"Sí. Somos mejores diciéndote por qué tu teoría es errónea que proponiendo otras mejores".

El padre de Alice suspiró. "Bien. No digo que me convenzas de nada, pero no quiero empantanarme en filosóficos cortes de pelo. Ahora que lo mencionas, la pregunta de Popper parece razonable. ¿Por qué los mundos no se fusionan y se separan? Si tenemos un giro que es una superposición igual de arriba y abajo, podemos predecir la probabilidad de observar cualquiera de los dos resultados si hacemos una medición en el futuro. Pero si tenemos un espín que es puramente hacia arriba, y se nos dice que

sólo se midió, no tenemos absolutamente ninguna manera de saber qué tipo de superposición era en la medición previa (excepto que no era puramente hacia abajo). ¿De dónde viene la diferencia?"

Alice parecía estar preparada para esto. "Eso es sólo termodinámica, en realidad. O al menos, es la flecha del tiempo, apuntando desde el pasado hacia el futuro. Recordamos el ayer pero no el mañana; la crema y el café se mezclan pero no se desmezclan espontáneamente. Las funciones de la onda se ramifican, pero no se desramarán".

"Suena sospechosamente circular. Según entiendo, una de las supuestas características de Muchos Mundos es que las funciones de onda sólo obedecen a la ecuación de Schrödinger; no hay un postulado de colapso separado. Cuando aprendí mecánica cuántica, sabíamos que las funciones de onda colapsaban hacia el futuro y no hacia el pasado, y eso era parte de las suposiciones. No veo por qué eso debería seguir siendo cierto para Everett, donde la ecuación de Schrödinger es completamente reversible. ¿Qué tienen que ver la crema y el café con las funciones de onda?"

Alice asintió. "Una pregunta perfectamente buena. Vamos a preparar el escenario un poco. La segunda ley de la termodinámica postula que la entropía, el desorden o la aleatoriedad de una configuración, como sabes, nunca disminuye en los sistemas cerrados. Ludwig Boltzmann explicó esto en la década de 1870. La entropía cuenta el número de formas en que los átomos pueden ser dispuestos para que el sistema se vea igual desde una perspectiva macroscópica. La razón por la que aumenta es simplemente que hay muchas más formas de tener alta entropía que de tener baja entropía, por lo que es improbable que la entropía disminuya alguna vez. ¿Verdad?"

"Claro", su padre estuvo de acuerdo. "Pero eso es todo clásico; Boltzmann no sabía nada de mecánica cuántica."

"Bien, pero la idea básica es la misma. Boltzmann explicó por qué la entropía tiende a aumentar, pero no dio ninguna razón por la que fuera baja en primer lugar. Hoy en día apreciamos que es un hecho cosmológico que el universo comenzó justo después del Big Bang en un estado ordenado, y la entropía ha estado aumentando naturalmente desde entonces, y así tenemos la flecha del tiempo. No sabemos realmente por qué el universo primitivo tenía una entropía tan baja, aunque algunos de nosotros tenemos ideas".

"Y esto es relevante porque..."

"Porque para los Everettianos, la explicación de la flecha cuántica del tiempo es la misma que la de la flecha entrópica del tiempo: las condiciones iniciales del universo. La ramificación ocurre cuando los sistemas se enredan con el entorno y la decoherencia, que se despliega a medida que el tiempo se mueve hacia el futuro, no hacia el pasado. El número de ramas de la función de onda, al igual que la entropía, sólo aumenta con el tiempo. Eso significa que el número de ramas era relativamente pequeño para empezar. En otras palabras, que había una cantidad relativamente baja de entrelazamiento entre varios sistemas y el medio ambiente en el pasado lejano. Al igual que con la entropía, esta es una condición inicial que imponemos al estado del universo, y en la actualidad no sabemos con seguridad por qué fue así".

"Bien", dijo su padre. "Es bueno admitir lo que no sabemos. Explicamos la flecha del tiempo, al menos según el estado actual de la técnica, apelando a condiciones iniciales especiales del pasado. ¿Es una sola condición la que explica tanto la flecha termodinámica como la flecha cuántica, o es sólo una analogía?"

"Creo que es más que una analogía, pero para ser honesto, este es un tema que probablemente podría ser objeto de una investigación un poco más rigurosa", respondió Alice. "Ciertamente parece haber una conexión. La entropía está relacionada con nuestra ignorancia. Si un sistema tiene baja entropía, hay relativamente pocas configuraciones microscópicas que se vean de esa manera, por lo que sabemos mucho sobre él sólo por sus características macroscópicas observables; si tiene alta entropía, sabemos relativamente poco. John von Neumann se dio cuenta de que podemos decir algo similar sobre los sistemas cuánticos enmarañados. Si un sistema está completamente desenredado con cualquier otra cosa, podemos hablar con seguridad de su función de onda de forma aislada del resto del mundo. Pero cuando está enredado, la función de onda individual no está definida, y sólo podemos hablar de la función de onda para el sistema combinado".

Su padre se iluminó. "Von Neumann era un tipo brillante, un verdadero héroe. Hubo un número increíble de físicos húngaros que emigraron a los EE.UU. -Szilard, Wigner, Teller- pero él era el mejor. Recuerdo vagamente que derivó una fórmula para la entropía."

Alice estuvo de acuerdo. "No hay duda. Von Neumann se dio cuenta de que había una equivalencia matemática entre una situación clásica en la que no estamos seguros del estado exacto de un sistema, que da lugar a la entropía, y la situación cuántica en la que dos subsistemas se enredan, por lo que no podemos hablar de la función de onda de ninguna de las dos piezas por separado. Derivó una fórmula para la "entropía de entrelazamiento" de un sistema cuántico. Cuanto más enredado esté algo con el resto del mundo, mayor será su entropía".

"Ajá", exclamó su padre con entusiasmo. "Ya veo a dónde quieres llegar con esto. El hecho de que las funciones de las ondas sólo se ramifiquen hacia adelante en el tiempo y no hacia atrás no es simplemente una reminiscencia del hecho de que la entropía aumenta, es el mismo hecho. La baja entropía del universo primitivo corresponde a la idea de que había muchos subsistemas sin enredar en aquel entonces. A medida que interactúan entre sí y se enredan, vemos eso como una ramificación de la función de onda".

"Exactamente", respondió Alice, con algo como el orgullo de una hija. "Todavía no estamos seguros de por qué el universo es así, pero una vez que aceptamos que el universo primitivo estaba en un estado relativamente desenredado y de baja entropía, todo lo demás sigue".

"Pero espera un minuto". Su padre parecía haberse dado cuenta de algo. "Según Boltzmann, la entropía sólo puede aumentar, no es una regla absoluta. Es en última instancia debido a los movimientos aleatorios de los átomos y moléculas, por lo que hay una probabilidad no nula de que la entropía baje espontáneamente. ¿Significa eso que es posible que la decoherencia se invierta algún día, y que los mundos se fusionen en lugar de separarse?"

"Absolutamente", dijo Alice con un guiño. "Pero al igual que con la entropía, la posibilidad de que eso ocurra es tan absurdamente pequeña que es irrelevante para nuestra vida diaria, o para cualquier experimento en la historia de la física. Es extremadamente improbable que dos configuraciones macroscópicamente distintas hayan vuelto a aparecer ni una sola vez en la vida de nuestro universo."

"¿Así que estás diciendo que hay una oportunidad?"

"Digo que si tu preocupación por muchos mundos es que las ramas de la función de la onda algún día se vuelvan a juntar, claramente has agotado todas las preocupaciones razonables y te estás agarrando a un clavo".

"Bueno, no nos pongamos demasiado llenos de nosotros mismos todavía", murmuró su padre, aparentemente volviendo a su postura escéptica. Levantó el palillo de su vaso y mordió una aceituna. "Déjame intentar entender lo que la teoría dice realmente. ¿Es correcto decir que el número de mundos que se producen en cada momento es literalmente infinitamente grande?"

"Bueno", respondió Alice, algo tímidamente, "me temo que una respuesta honesta a esa pregunta va a requerir un poco más de filosofía".

"¿Por qué no me sorprende?"

"Podemos volver a la entropía como una analogía. Cuando Boltzmann llegó a su fórmula de entropía, contó el número de arreglos microscópicos de un sistema que se veía macroscópicamente igual. A partir de ahí, fue capaz de argumentar que la entropía debería aumentar naturalmente."

"Claro", dijo su padre. "Pero eso es física real y honesta, algo que podemos probar experimentalmente. No estoy seguro de qué tiene que ver con tus vuelos de fantasía de muchos mundos".

"Decimos eso ahora. Pero tienes que imaginar lo que la gente pensaba en ese momento." Alice se estaba acomodando cómodamente en el modo de profesor, su Burdeos momentáneamente olvidado. "Boltzmann tenía razón, pero se plantearon varias objeciones a su idea. Una era que estaba convirtiendo la entropía de una característica objetiva de un sistema físico en una subjetiva, que dependía de alguna noción de "parece igual". Otra era que degradaba la segunda ley de una declaración absoluta a una mera tendencia - no era que la entropía aumentara necesariamente, sino que era muy probable que lo hiciera. Las partículas se mueven al azar, y es muy probable que evolucionen hacia un estado de mayor entropía, pero no es una certeza legal. Con la sabiduría de los años acumulados, podemos ver que la naturaleza subjetiva de la definición de Boltzmann no impide que sea útil, y el hecho de que la segunda ley sea una muy buena aproximación en lugar de una ley absoluta e inquebrantable es más que suficiente para cualquier propósito que podamos tener".

"Lo entiendo", respondió su padre. "La entropía es algo objetivamente real, pero podemos definirla y medirla sólo después de tomar algunas decisiones. Pero eso nunca me molestó realmente, ¡es útil! No estoy seguro de que los mundos extras lo sean realmente".

"Llegaremos a eso, pero primero déjame elaborar esta analogía. Como la entropía, la noción de "mundo" en la mecánica cuántica de Everet es un concepto de nivel superior, no fundamental. Es una aproximación útil que proporciona una visión física genuina. Las ramas separadas de la función de la onda no se ponen como parte de la arquitectura básica de la teoría. Es extraordinariamente conveniente para nosotros los seres humanos pensar en una superposición de muchos de esos mundos, en lugar de tratar el estado cuántico como una abstracción indiferenciada".

Los ojos de su padre se abrieron un poco. "Esto es peor de lo que temía. Suena como si me dijeras que un 'mundo' ni siquiera es un concepto bien definido en muchos mundos".

"Están tan bien definidos como lo está la entropía. Si fuéramos un demonio Laplace del siglo XIX, que conociera la posición y el momento de cada partícula del universo, nunca tendríamos que rebajarnos a definir una noción de grano grueso como "entropía". Del mismo modo, si conociéramos la función exacta de las ondas del universo, nunca tendríamos que hablar de "ramas". Pero en ambos casos somos pobres criaturas finitas con información dramáticamente incompleta, e invocar estos conceptos de alto nivel es extremadamente útil".

Alice podía ver que su padre estaba perdiendo la paciencia. "Sólo quiero saber cuántos mundos hay", dijo. "Si no puedes responder a eso, no estás haciendo un buen trabajo de ventas aquí."

"Debe ser esa devoción a la honestidad bajo cualquier circunstancia que me inculcaste a temprana edad", dijo Alice encogiéndose de hombros. "Depende de cómo dividamos el estado cuántico en mundos."

"¿Y no hay alguna forma correcta obvia?"

"¡A veces! En situaciones simples en las que las mediciones tienen un resultado manifiestamente discreto, como la medición del espín de un electrón, podemos decir con seguridad que la función de onda se ramifica en dos, y el número de mundos (sea cual sea) se duplica. Cuando estamos midiendo una cantidad que en principio es continua, como la posición de una partícula, las cosas están menos definidas. En ese caso podemos definir un peso total unido a un cierto rango de resultados, la función de onda al cuadrado, pero no un número absoluto de ramas. Ese número dependería de cuán finamente queramos subdividir nuestra descripción del resultado de la medición, que es en última instancia una elección que depende de nosotros. Una de mis citas favoritas en este sentido es de David Wallace: "Preguntar cuántos mundos hay es como preguntar cuántas experiencias tuviste ayer, o cuántos arrepentimientos ha tenido un criminal arrepentido". Tiene mucho sentido decir que tú tuviste muchas experiencias o que él tuvo muchos arrepentimientos; tiene mucho sentido enumerar las categorías más importantes de cualquiera de los dos; pero no es una pregunta para preguntar *cuántos*".

El padre de Alice no parecía realmente satisfecho con esto. Después de una pausa pensativa, respondió: "Mira, estoy tratando de ser justo aquí. Aceptaré que los mundos no son fundamentales, así que hay algo aproximado en cómo se definen. Pero seguramente puede decirme si hay sólo un número finito de ellos o el número es realmente infinito."

"Es una pregunta justa", Alice estuvo de acuerdo, tal vez un poco de mala gana. "Desafortunadamente, no sabemos la respuesta. Hay un límite superior en el número de mundos, que es sólo el tamaño del espacio de Hilbert, el espacio de todas las funciones de onda posibles."

"Pero sabemos que el espacio de Hilbert es infinitamente grande", intervino su padre. "Incluso para una sola partícula, el espacio de Hilbert es infinitamente dimensional, por no hablar de la teoría cuántica de campos. Así que el número de mundos suena como si fuera infinito."

"No estamos seguros de que el espacio Hilbert para nuestro universo real tenga un número finito o infinito de dimensiones. Ciertamente sabemos de algunos sistemas para los cuales el espacio apropiado de Hilbert es de dimensiones finitas. Un qubit simple es un spin-up o spin-down, por lo que corresponde a un espacio Hilbert bidimensional. Si tenemos *N* qubits, el correspondiente espacio de Hilbert es de 2N-dimensional-el tamaño del espacio de Hilbert crece exponencialmente a medida que incluimos más partículas. Una taza de café contiene aproximadamente 1025 electrones, protones y neutrones, cada uno de cuyos giros se describe por un qubit. Así que el espacio de Hilbert para una taza de café, incluyendo los giros, sin preocuparse por la ubicación de las partículas, tiene una dimensionalidad de aproximadamente $2^{10^{25}}$...

"No hace falta decir", continuó Alice, "que es un número muy grande. Uno seguido de 1025 ceros, si lo escribes en binario. Lo cual no tendrías tiempo de hacer, incluso si hubieras estado trabajando durante toda la vida de nuestro universo observable".

"Pero obviamente estás haciendo trampa, el número real es mucho más grande que eso", dijo su padre. "Estás contando giros, pero las partículas reales también tienen ubicaciones en el espacio. Y hay un número infinito de tales ubicaciones. Por eso el espacio de Hilbert para una colección de partículas es infinito-dimensional-el número de dimensiones es sólo el número de posibles resultados de medición".

"Bien". Y es cierto, el propio Hugh Everett pensaba que cada medida cuántica dividía el universo en un número infinito de mundos, y se sentía cómodo con eso. Infinito suena como un gran número, pero usamos cantidades infinitas en la física todo el tiempo. El número de números reales entre el 0 y el 1 es infinito, como sabes. Si el espacio de Hilbert es infinito, no tiene mucho sentido hablar del número de mundos individuales. Pero podemos agrupar un conjunto de mundos similares y hablar del peso total (amplitud-cuadrado) que tienen en comparación con algún otro grupo".

"Grandioso". Así que el espacio de Hilbert es infinito, y el número de mundos es infinito, pero ¿quieres afirmar que sólo debemos hablar del peso relativo de los diferentes tipos de mundos?"

"No, aún no he terminado", insistió Alice. "El mundo real no es un montón de partículas, ni siquiera está descrito por la teoría de campo cuántico."

"¿No lo es?" dijo su padre con fingida consternación. "¿Qué he estado haciendo toda mi vida?"

"Has estado ignorando la gravedad", respondió Alice, "lo cual es algo perfectamente sensato para hacer mientras piensas en la física de partículas. Pero hay indicaciones de la gravedad cuántica de que el número de distintos estados cuánticos posibles es finito, no infinito. Si eso es cierto, hay un número máximo de mundos de los que podríamos hablar sensatamente, dado por la dimensionalidad del espacio de Hilbert. El tipo de estimaciones que se hacen para el número de dimensiones del espacio de Hilbert de nuestro universo observable son cosas como $10^{10^{122}}$... Un gran número", admitió Alice, "pero incluso los grandes números finitos son mucho más pequeños que el infinito".

Su padre parecía pensar en esto. "No estoy seguro de que sepamos algo muy fiable sobre la gravedad cuántica..."

"Tal vez no. Por eso dije que no sabemos si el número de mundos es finito o infinito".

"Me parece justo. Pero eso plantea una preocupación totalmente nueva. Me parece que las ramificaciones deberían ocurrir todo el tiempo, cada vez que un sistema cuántico se enreda con su entorno. ¿Es concebible que este número que acaba de citar, aunque alucinantemente grande, no sea lo suficientemente grande? ¿Estamos seguros de que hay suficiente espacio en el espacio de Hilbert para todas las ramas de la función de onda que se están produciendo a medida que el universo evoluciona?"

"Hmm, nunca pensé en eso, para ser honesto." Alice agarró una servilleta y comenzó a garabatear algunos números en ella. "Veamos, hay alrededor de 1088 partículas dentro de nuestro universo observable, la mayoría fotones y neutrinos. La mayoría de estas partículas viajan pacíficamente a través del espacio, sin interactuar o enredarse con nada. Así que como una generosa sobreestimación, imaginemos que cada partícula en el universo interactúa y divide la función de la onda en dos millones de veces por segundo, y lo ha estado haciendo desde el Big Bang, que fue hace unos 10^{18} segundos. Eso es $1088 \times 10^{6} \times 10^{18} = 10^{112}$ divisiones, produciendo un número total de ramas de $2^{10^{112}}$."

"¡Lindo!" Alice parecía satisfecha consigo misma. "Es un número muy grande, pero mucho más pequeño que el número de dimensiones en el espacio Hilbert del universo. Lamentablemente más pequeño, en realidad. Y debería ser una sobreestimación segura del número de ramas necesarias. Así que incluso si la pregunta de cuántas ramas hay no tiene una respuesta definitiva, no tenemos que preocuparnos de que el espacio de Hilbert se quede sin espacio".

"Bueno, bien, me preocupé por un segundo." El martini de su padre sabía agradablemente salado por las aceitunas. Miró a Alice, con un brillo en sus ojos. "¿Realmente nunca te habías hecho esa pregunta antes?"

"Creo que la mayoría de los Everettianos se entrenan a sí mismos para pensar en los pesos relativos de varias ramas diferentes de la función de la onda, en lugar de contar realmente nada. No sabemos la respuesta definitiva, así que no parece demasiado fructífero preocuparse por ello."

"Tendré que procesar esto un poco, porque siempre pensé que se suponía que había un número infinito de mundos, y que muchos mundos implicaban que todo sucedía en algún lugar. Que todos los mundos posibles existen ahí fuera en la función de onda. Pensé que ese era el punto de venta. Cuando estaba atascado en un cálculo, era reconfortante pensar que había otro mundo en el que yo era una llama, o un genio multimillonario filántropo playboy".

"Espera, ¿tú no?" Alice fingió sorpresa. "Siempre pensé que te parecías un poco a una llama."

"Quiero decir, para el caso, en algún mundo debería ser una llama billonaria."

"Antes de que nos desviemos del camino", continuó, "déjame notar que no eres tú quien sería una llama o un billonario, esos serían otros seres completamente. Estoy seguro de que volveremos a eso. Pero de una relevancia más directa para el tema, Muchos Mundos no dice 'todo lo posible sucede'; dice 'la función de onda evoluciona de acuerdo a la ecuación de Schrödinger'. Algunas cosas no suceden, porque la ecuación de Schrödinger nunca lleva a que sucedan. Por ejemplo, nunca veremos a un electrón convertirse espontáneamente en un protón. Eso cambiaría la cantidad de carga eléctrica, y la carga se conserva estrictamente. Así que la ramificación nunca creará, por ejemplo, universos con más o menos carga de lo que empezamos. Sólo porque sucedan muchas cosas en la mecánica cuántica de Everet, no significa que todo suceda."

El padre de Alice levantó las cejas con escepticismo. "Querida, seguramente estás siendo quisquillosa para salvar las apariencias. Tal vez no todo suceda estrictamente, pero creo que es cierto que muchas cosas locas suceden en varios mundos, ¿no?"

"Claro, estoy feliz de admitirlo. Cada vez que te encuentras con una pared, la función de la onda se ramifica en varios mundos: algunos en los que te hieres la nariz, otros en los que haces un túnel inofensivo, y otros en los que rebotas y eres lanzado a través de la habitación, por ejemplo".

"Pero eso importa mucho, ¿no? En la mecánica cuántica ordinaria, la probabilidad de que un objeto macroscópico atraviese una pared no es cero, pero es inimaginablemente pequeña, y podemos simplemente ignorarla. En muchos mundos, la probabilidad es del 100 por ciento de que ocurra en algún mundo".

Alice asintió, pero su expresión era la de alguien que había pasado por este terreno muchas veces antes. "Tienes toda la razón en que esto es una diferencia. Pero yo diría que no importa en absoluto. Si aceptas cómo los Everettianos derivan la regla de Born, debes *actuar como si* hubiera una probabilidad de que hagas un túnel a través del muro, y esa probabilidad es tan absurdamente pequeña que no hay razón alguna para tenerla en cuenta en tu vida diaria. Y si no aceptas ese argumento, hay una preocupación mucho más seria sobre muchos mundos para que te preocupes."

Su padre estaba decidido. "Creo que el tema de estos mundos de baja probabilidad es importante. ¿Qué pasa con los observadores que, en el conjunto de los mundos de Everettia, terminan viendo eventos que aparentemente desafían nuestras predicciones de la regla de Born? Si medimos un giro cincuenta veces, habrá ramas en las que todos los resultados se leerán como giros, y otras en las que todos se leerán como giros. ¿Qué se supone que deben concluir esos pobres observadores sobre la mecánica cuántica?"

"Bueno", dijo Alice, "sobre todo tenemos que decir que es una lástima para ellos. Las cosas pasan. Pero el peso total asignado a estos observadores es tan pequeño que no debemos preocuparnos demasiado por ellos. Por no mencionar que, después de que obtengan cincuenta spin-ups en una fila, los próximos cincuenta ensayos todavía se asignarán a las predicciones de la regla de Born con una probabilidad abrumadora. Lo más probable es que atribuyan su racha de suerte original al error experimental, y que tengan una historia divertida que contar a sus compañeros de laboratorio. Es como un universo clásico que es realmente grande. Si las condiciones que vemos en el universo que nos rodea continúan infinitamente lejos en todas las direcciones, es abrumadoramente probable que haya otras civilizaciones como la nuestra, un número infinito, en experimentos de hecho para probar la mecánica cuántica. Incluso si cada una de ellas es probable que vea las probabilidades de la regla de Born, dado que hay un número infinito de ellas, algunas de ellas verán estadísticas muy diferentes. En ese caso, pueden ser llevados a sacar conclusiones incorrectas sobre cómo funciona la mecánica cuántica. Esos observadores no tendrían suerte, pero podemos consolarnos en el hecho de que también son muy poco frecuentes entre el conjunto de todos los observadores del universo".

"¡Pequeño consuelo para ellos! En su visión de la física, siempre habrá observadores que se equivocan totalmente con las leyes de la naturaleza".

"Nadie les prometió nunca un jardín de rosas. Esa preocupación existe en cualquier teoría en la que hay un número suficientemente grande de observadores; Muchos Mundos es sólo un ejemplo de tal teoría. El punto es que en la mecánica cuántica de Everet, hay una manera de comparar todos los diferentes mundos: tomar las amplitudes de sus ramas, y cuadrarlas. Las ramas en las que ocurren cosas muy sorprendentes tienen amplitudes muy, muy pequeñas. Son raras en el conjunto de todos los mundos. No deberíamos estar más preocupados por su existencia que por los desafortunados observadores en universos infinitamente grandes."

"No estoy seguro de estar convencido, pero dejemos constancia de mi preocupación y sigamos adelante". Entrecerró los ojos ante la lista de preguntas que había planteado en su teléfono. "He estado leyendo un poco, incluso algunos de sus papeles, y una cosa que aprecio de Muchos Mundos es que elimina cualquier misterio persistente sobre cuándo se realiza una medición. No hay nada especial en la medición; es sólo cuando un sistema cuántico que está en superposición se enreda con el entorno más grande, llevando a la decoherencia y la ramificación de la función de onda. Pero sólo hay una función de onda, la función de onda del universo, que describe todo a través del espacio. ¿Cómo deberíamos pensar en la ramificación desde una perspectiva global? ¿La ramificación ocurre de una sola vez, o se extiende gradualmente desde el sistema donde ocurrió la interacción?"

"Oh chico. Tengo el presentimiento de que esta va a ser otra respuesta insatisfactoria". Alice se detuvo para rebanar un trozo de queso. Lo colocó cuidadosamente en una galleta mientras pensaba

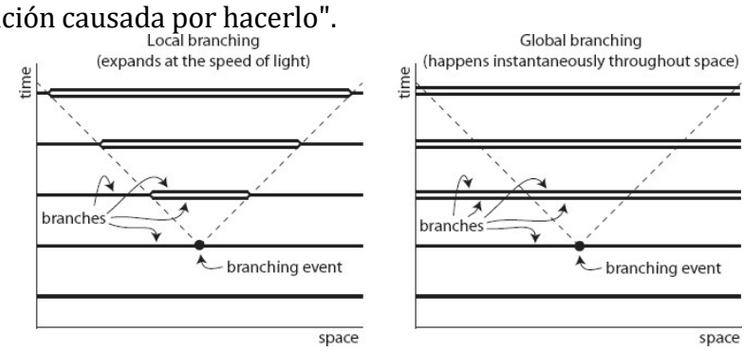
en la mejor respuesta. "Básicamente: eso depende de ti. O, para poner el punto en un lenguaje más respetable, el mismo fenómeno de "ramificación" es uno que nosotros los humanos inventamos para proveer una descripción conveniente de una complicada función de onda, y si pensamos que la ramificación ocurre de una sola vez o que se extiende desde un punto depende de lo que sea más conveniente para la situación."

Su padre sacudió la cabeza. "Creía que la ramificación era el objetivo. ¿Cómo puedes sostener a Muchos Mundos como una respetable teoría científica si no sólo no puedes observar las otras ramas, y no sólo no puedes contarlas, sino que ni siquiera tienes un criterio definido de cómo sucede? La ramificación es sólo, como, ¿tu opinión, hombre?" Siempre le habían gustado demasiado las referencias a las películas.

"En cierto sentido, claro. Pero hay opiniones mejores y peores que tener. Tal vez prefiera una descripción en la que nada viaja más rápido que la velocidad de la luz. Lo que realmente importa es que no puedes comunicarte o enviar información más rápido que la luz, y eso es cierto sin importar la descripción que elijas usar. Pero si te hace sentir mejor limitar un efecto aparentemente físico como la ramificación para que no se propague más rápido que la luz, eres perfectamente bienvenido a hacerlo. En ese caso, el número de ramas de la función de la onda sería diferente dependiendo de donde estuvieras en el espacio tiempo". Sacó una servilleta nueva y comenzó a garabatear de nuevo, esta vez haciendo pequeños diagramas a partir de líneas rectas. "Aquí tenemos el espacio yendo de izquierda a derecha y el tiempo yendo hacia arriba. Los rayos de luz que podrían ser emitidos por un evento se moverán hacia arriba en ángulos de 45 grados. Si empezamos con una sola rama de la función de onda, podemos imaginarnos que se ramifica en ese evento, y luego se propaga hacia arriba en el tiempo, pero sólo crece a la velocidad de la luz. Los observadores más lejanos serían descritos por una sola rama, mientras que los más cercanos serían descritos por dos ramas. Esto encaja bien con la idea de que los observadores distantes no tienen forma de saber, o ser influenciados por el evento de ramificación, mientras que los cercanos sí la tienen".

Su padre estudió el diagrama. "Ya veo. Supongo que asumí que las ramificaciones ocurrieron simultáneamente en todo el universo, lo que me molestó como alguien que es muy aficionado a la relatividad especial. Estoy seguro de que sabe tan bien como yo que diferentes observadores definirán la simultaneidad de manera diferente. Me gusta más esta imagen, en la que las ramas se propagan hacia afuera a la velocidad de la luz. Todos los efectos parecen bastante locales".

Alice agitó sus manos antes de volver a dibujar. "Pero la otra forma funciona también. Se nos permite igualmente describir la ramificación como algo que ocurre en todo el universo de una sola vez. Este punto de vista es útil cuando derivamos la regla de Born usando la incertidumbre de auto-localización, ya que podemos hablar sensatamente sobre en qué rama estás inmediatamente después de que la ramificación ocurre, sin importar dónde ocurrió. Debido a la relatividad, los observadores que se mueven a diferentes velocidades dibujarán las ramas de manera diferente, pero no hay diferencia de observación causada por hacerlo".



"Arrgh! Acabas de deshacer todo tu buen trabajo. Ahora me dices que la ramificación puede ser considerada como algo completamente no local."

"Sí, pero lo que estoy diciendo es que la pregunta '¿Es Many-Worlds una teoría local?' no es la correcta. Sería mejor preguntar: "¿Podemos describir la ramificación como un proceso local, procediendo sólo dentro del futuro cono de luz de un evento? La respuesta es: "Sí, pero también podemos describirlo como un proceso no local, que ocurre instantáneamente en todo el universo".

Su padre puso sus manos sobre su cara, pero parecía estar tratando de absorber esto, no sólo rindiéndose en la frustración. Entonces se levantó y se mezcló otro martini, con la frente arrugada. Volvió a su asiento, con la bebida en una mano y unos cacahuetes en la otra. "Supongo que el punto es que si creo que una persona lejana se ha ramificado o no, no hay ninguna diferencia para ellos. Puedo pensar en ellos como una sola copia, o como dos copias absolutamente idénticas. Es sólo una cuestión de descripción".

"¡Exactamente!" exclamó Alice. "Si pensamos que la ramificación se propaga hacia afuera a la velocidad de la luz o que ocurre de una sola vez es sólo cuestión de lo que es más conveniente. No es más preocupante que el hecho de que podemos medir la longitud en centímetros o pulgadas."

Su padre puso los ojos en blanco. "¿Qué clase de bárbaro mide la longitud en pulgadas?"

"Bien, cambiemos de marcha", dijo después de un momento. "Sé que a los teóricos de cuerdas y a otras personas que no están muy atadas a la realidad les gusta hablar de dimensiones adicionales. ¿Las ramas viven allí? ¿Dónde se encuentran estos otros mundos?"

"Oh, vamos, Robert." Alice tendía a llamar a su padre por su nombre de pila cuando estaba molesta con él. "Sabes que no es así. Las ramas no están 'localizadas' en ningún lugar. Si estás atascado pensando que las cosas tienen ubicación en el espacio, puede parecer natural preguntar dónde están los otros mundos. Pero no hay ningún 'lugar' donde esas ramas se escondan; simplemente existen simultáneamente, junto con el nuestro, efectivamente fuera de contacto con él. Supongo que existen en el espacio de Hilbert, pero ese no es realmente un "lugar". Hay más cosas en el cielo y en la tierra de las que se sueñan en su filosofía." Estaba orgullosa de mantener sus referencias shakesperianas.

"Sí, lo sé. Estamos a un par de tragos, pensé que debería tirarte una pelota de softball."

Bajó un poco el documento en su teléfono. "Muy bien, vamos a ponernos más serios. Este me ha estado molestando desde siempre. ¿Qué hay de la conservación de la energía? ¿De dónde vienen todas esas *cosas* cuando de repente creas un universo completamente nuevo?"

"Bueno", respondió Alice, "sólo piensa en la mecánica cuántica ordinaria de los libros de texto. Dado un estado cuántico, podemos calcular la energía total que describe. Mientras la función de onda evolucione estrictamente de acuerdo con la ecuación de Schrödinger, esa energía se conserva exactamente, ¿verdad?"

"Seguro".

"Eso es todo. En muchos mundos, la función de onda obedece a la ecuación de Schrödinger, que conserva la energía".

"¿Pero qué pasa con los mundos extra?", insistió su padre. "Podría medir la energía contenida en este mundo que veo a mi alrededor, y dices que se duplica todo el tiempo."

Alice sintió que estaba en terreno firme con este. "No todos los mundos son creados iguales. Piensa en la función de la onda. Cuando describe múltiples mundos ramificados, podemos calcular la cantidad total de energía sumando la cantidad de energía de cada mundo, multiplicando el peso (la amplitud al cuadrado) de ese mundo. Cuando un mundo se divide en dos, la energía en cada mundo es básicamente la misma que antes en el mundo único (en lo que respecta a cualquiera que viva en su interior), pero sus contribuciones a la energía total de la función de onda del universo se han dividido por la mitad, ya que sus amplitudes han disminuido. Cada mundo se hizo un poco más delgado, aunque sus habitantes no pueden notar ninguna diferencia".

"Matemáticamente veo lo que dices", admitió su padre. "Pero parece que me falta algo de intuición aquí. Tengo, digamos, una bola de bolos, con una cierta masa y energía potencial. Pero entonces alguien en la habitación de al lado observa un giro cuántico y ramifica la función de la onda. Ahora hay dos bolas de bolos, cada una de las cuales tiene la energía de la anterior. ¿No?"

"Eso ignora las amplitudes de las ramas. La contribución de la bola de boliche a la energía del universo no es sólo la masa y la energía potencial de la bola; es que, multiplicado por el peso de su rama de la función de onda. Después de la división parece que tienes dos bolas de bolos, pero juntas contribuyen exactamente tanto a la energía de la función de onda como lo hacía antes la única bola de bolos".

Su padre pareció reflexionar sobre esto. "No estoy seguro de estar de acuerdo contigo, pero creo que me estás agotando", murmuró. Después de un momento volvió a su lista de preguntas.

"Sabes, creo que sólo me queda una pregunta." El padre de Alice guardó su teléfono, bebió un poco más de su segundo martini, y se inclinó un poco. "¿Realmente crees esto? ¿Honestamente? ¿Que múltiples copias de mí aparecen cada vez que alguien mide el giro de una partícula?"

Alice se sentó en su silla, saboreó un poco de su vino, y parecía pensativa. "Sabes, realmente lo hago. Al menos, personalmente encuentro que la mecánica cuántica de Everet, y todos los muchos mundos que implica, es de lejos la versión más plausible de la teoría cuántica que conozco. Si eso significa que debo aceptar que mi yo presente evolucionará en un número de yo futuros ligeramente diferentes que nunca podrán hablar entre sí, estoy dispuesto a aceptarlo. Sujeto, como siempre, a ser actualizado en el futuro si aparece nueva información, ya sea en forma de resultados experimentales o nuevos conocimientos teóricos".

"Tan buen empirista". Su padre sonrió.

"Permítame citar a David Deutsch", ofreció Alice. "Una vez dijo, 'A pesar del éxito empírico sin igual de la teoría cuántica, la misma sugerencia de que puede ser literalmente verdadera *como descripción de la naturaleza sigue siendo recibida* con cinismo, incomprensión e incluso ira."

"¿Qué se supone que significa eso? Todo físico piensa que la mecánica cuántica describe la naturaleza".

"Creo que cuando Deutsch dice 'teoría cuántica', implícitamente se refiere a muchos mundos". Ahora era el turno de Alice para sonreír. "Lo que quería decir era que mucha gente rechaza la mecánica cuántica de Everet más por un sentido visceral de desagrado que por una serie de preocupaciones de principios. Pero como el filósofo David Lewis dijo una vez, "No sé cómo refutar una mirada incrédula".

"Espero que no me incluyas allí." El padre de Alice parecía un poco ofendido. "Sólo he estado tratando de entender la teoría de una manera basada en principios."

"¡Tú lo has hecho!" Alice respondió. "La conversación que acabamos de tener, tanto si te convencí o no de algo, es de lo que todos los físicos reflexivos deberían hablar. Lo que me importa no es que todo el mundo se convierta en un Everettiano, sino que la gente se tome en serio el reto de entender la mecánica cuántica. Prefiero dialogar con alguien que se dedica a proponer variables ocultas, por ejemplo, que tratar de captar el interés de alguien a quien simplemente no le importa".

Su padre asintió con la cabeza. "Me ha llevado un tiempo, lo admito. Pero sí, me importa." Sonrió a su hija. "Nuestra misión es entender las cosas, ¿no es así?"

9

Otras formas

Alternativas a muchos mundos

David Albert, ahora profesor de filosofía en Columbia y uno de los principales investigadores del mundo en los fundamentos de la mecánica cuántica, tuvo una experiencia muy típica como estudiante de postgrado que se interesó en los fundamentos cuánticos. Estaba en el programa de doctorado del departamento de física de la Universidad de Rockefeller cuando, después de leer un libro del filósofo del siglo XVIII David Hume sobre la relación entre el conocimiento y la experiencia, llegó a creer que lo que le faltaba a la física era una buena comprensión del problema de la medición cuántica. (Hume no conocía el problema de la medición, pero Albert conectó puntos en su cabeza.) Nadie en Rockefeller a finales de los 70 estaba interesado en pensar en esas líneas, así que Albert inició una colaboración a larga distancia con el famoso físico israelí Yakir Aharonov, que dio lugar a varios trabajos influyentes. Pero cuando sugirió presentar ese trabajo para su tesis de doctorado, los poderes que había en Rockefeller se horrorizaron. Bajo pena de ser expulsado del programa por completo, Albert fue obligado a escribir una tesis separada en física matemática. Fue, como él recordó, "claramente asignada porque se pensó que sería buena para mi personaje.Había un elemento explícitamente punitivo allí".

Los físicos han sido muy malos para llegar a un consenso sobre cuáles son los fundamentos de la mecánica cuántica. Pero en la segunda mitad del siglo XX, llegaron a un notable grado de consenso sobre un tema relacionado: cualesquiera que sean los fundamentos de la mecánica cuántica, ciertamente no deberíamos *hablar* de ellos. No mientras haya trabajo real por hacer, haciendo cálculos y construyendo nuevos modelos de partículas y campos.

Everett, por supuesto, dejó la academia sin siquiera intentar convertirse en profesor de física. David Bohm, que había estudiado y trabajado con Robert Oppenheimer en la década de 1940, propuso una ingeniosa forma de utilizar variables ocultas para abordar el problema de la medición. Pero después de un seminario en el que otro físico explicó las ideas de Bohm, Oppenheimer se burló en voz alta, "Si no podemos refutar a Bohm, entonces debemos acordar ignorarlo". John Bell, que hizo más que nadie para iluminar la naturaleza aparentemente no local del entrelazamiento cuántico, ocultó a propósito su trabajo sobre este tema a sus colegas en el CERN, a quienes se presentó como un teórico de partículas relativamente convencional. Hans Dieter Zeh, que fue pionero en el concepto de decoherencia como joven investigador en los años 70, fue advertido por su mentor de que trabajar en este tema destruiría su carrera académica. De hecho, le resultó muy difícil publicar sus primeros trabajos, ya que los árbitros de las revistas le dijeron que "el trabajo no tiene ningún sentido" y que "la teoría cuántica no se aplica a los objetos macroscópicos". El físico holandés Samuel Goudsmit, como editor de *Physical Review*, publicó un memorándum en 1973 prohibiendo explícitamente a la revista incluso considerar artículos sobre fundamentos cuánticos a menos que hicieran nuevas predicciones experimentales. (Si esa política hubiera estado en vigor antes, la revista habría tenido que rechazar el artículo de Einstein-Podolsky-Rosen, así como la respuesta de Bohr).

Sin embargo, como estas mismas historias dejan claro, a pesar de una variedad de obstáculosen su camino, un subconjunto de físicos y filósofos perseveraron en el esfuerzo de comprender mejor la naturaleza de la realidad cuántica. La teoría de los muchos mundos, especialmente una vez que el proceso de ramificación de la función de onda ha sido iluminado por la decoherencia, es un enfoque prometedor para responder a los enigmas planteados por el problema de la medición. Pero hay otros que vale la pena considerar. Valen la pena tanto porque pueden ser correctas (que es siempre la mejor razón) como porque la comparación de las muy diferentes formas en que funcionan nos ayuda a apreciar mejor la mecánica cuántica, sin importar cuál sea nuestro enfoque favorito.

A lo largo de los años se ha propuesto un número impresionante de formulaciones alternativas de la teoría cuántica. (El artículo relevante de Wikipedia enumera dieciséis "interpretaciones" explícitamente, junto con una categoría para "otros".) Aquí consideraremos tres competidores básicos del enfoque de Everett: el colapso dinámico, las variables ocultas y las teorías epistémicas. Aunque están lejos de ser exhaustivas, sirven para ilustrar las estrategias básicas que la gente ha tomado.

La virtud de Muchos Mundos está en la simplicidad de su formulación básica: hay una función de onda que evoluciona de acuerdo con la ecuación de Schrödinger. Todo lo demás es un comentario. Algunos de esos comentarios, como la división en sistemas y su entorno, la decoherencia y la ramificación de la función de onda, son extremadamente útiles y, de hecho, indispensables para hacer coincidir la nítida elegancia del formalismo subyacente con nuestra desordenada experiencia del mundo.

Cualquiera que sea su sentimiento sobre Muchos Mundos, su simplicidad proporciona un buen punto de partida para considerar alternativas. Si sigues siendo profundamente escéptico de que haya buenas respuestas al problema de la probabilidad, o simplemente te repele la idea de todos esos mundos ahí fuera, la tarea a la que te enfrentas es modificar Muchos Mundos de alguna manera. Dado que Muchos mundos es sólo "funciones de onda y la ecuación de Schrödinger", se sugieren inmediatamente algunas formas plausibles de avanzar: alterar la ecuación de Schrödinger para que nunca se desarrollen mundos múltiples, añadir nuevas variables además de la función de onda, o reinterpretar la función de onda como una declaración sobre nuestro conocimiento en lugar de una descripción directa de la realidad. Todos estos caminos han sido recorridos con entusiasmo.

Pasamos primero a la posibilidad de alterar la ecuación de Schrödinger. Este enfoque parece estar en la zona de confort de la mayoría de los físicos; casi antes de que se haya establecido una teoría exitosa, los teóricos se preguntan cómo podrían jugar con las ecuaciones subyacentes para hacerla aún mejor. El propio Schrödinger esperaba originalmente que su ecuación describiera ondas que se localizaban naturalmente en manchas que se comportaban como partículas cuando se las veía desde lejos. Tal vez alguna modificación de su ecuación podría lograr esa ambición, e incluso proporcionar una resolución natural al problema de la medición sin permitir múltiples mundos.

Esto es más difícil de lo que parece. Si intentamos lo más obvio, agregando nuevos términos como Ψ^2 a la ecuación, tendemos a arruinar importantes características de la teoría, como el conjunto total de probabilidades que suman uno. Este tipo de obstáculo raramente disuade a los físicos. Steven Weinberg, que desarrolló el exitoso modelo que unificó las interacciones electromagnéticas y débiles en el Modelo Estándar de la física de partículas, propuso una ingeniosa modificación de la ecuación de Schrödinger que logra mantener la probabilidad total a lo largo del tiempo. Sin embargo, esto tiene un costo; la versión más simple de la teoría de Weinberg permite enviar señales más rápido que la luz entre las partículas enredadas, a diferencia del teorema de no-señalización de la mecánica cuántica ordinaria. Esta falla puede ser reparada, pero entonces ocurre algo aún más extraño: no sólo hay todavía otras ramas de la función de onda, sino que se pueden enviar señales entre ellas, construyendo lo que el físico Joe Polchinski apodó un "teléfono Everett". Tal vez eso sea algo bueno, si quieres basar tus elecciones de vida en el resultado de una medición cuántica y luego comprobar con tus yos alternativos para ver cuál resultó ser el mejor. Pero no parece ser la forma en que la naturaleza funciona realmente. Y no logra resolver el problema de la medición o deshacerse de otros mundos.

En retrospectiva, esto tiene sentido. Considere un electrón en un estado puro de spin-up. Eso puede expresarse igualmente como una superposición igual de spin-izquierda y spin-derecha, de modo que una observación a lo largo de un campo magnético horizontal tiene un 50 por ciento de posibilidades de observar cualquiera de los dos resultados. Pero precisamente debido a esa igualdad entre las dos opciones, es difícil imaginar cómo una ecuación determinista podría predecir que veríamos una u otra (al menos sin la adición de nuevas variables que lleven información adicional). Algo tendría que romper el equilibrio entre el giro a la izquierda y el giro a la derecha.

Por lo tanto, tenemos que pensar un poco más dramáticamente. En lugar de tomar la ecuación de Schrödinger y jugar suavemente con ella, podemos morder la bala e introducir una forma completamente separada para que las funciones de onda evolucionen, una que aplaste la aparición de múltiples ramas. Muchas pruebas experimentales nos aseguran que las funciones de onda *suelen obedecer a* la ecuación de Schrödinger, al menos cuando no las observamos. Pero tal vez, rara vez pero crucialmente, hacen algo muy diferente.

¿Qué podría ser esa cosa diferente? Buscamos evitar el horror existencial de que múltiples copias del mundo macroscópico se describan en una función de onda única. Entonces, ¿qué pasaría si imagináramos que las funciones de onda sufren un ocasional colapso *espontáneo*, convirtiéndose repentinamente de estar dispersas en diferentes posibilidades (digamos, posiciones en el espacio) a estar relativamente bien localizadas alrededor de un solo punto? Esta es la nueva característica clave de los modelos de colapso dinámico, el más famoso de los cuales es la *teoría GRW*, después de sus inventores Giancarlo Ghirardi, Alberto Rimini y Tullio Weber.

Imaginen un electrón en el espacio libre, no ligado a ningún núcleo atómico. Según la ecuación de Schrödinger, la evolución natural de una partícula de este tipo es que su función de onda se extienda y se haga cada vez más difusa. A esta imagen, la GRW añade un postulado que dice que en cada momento hay alguna probabilidad de que la función de onda cambie radical e instantáneamente. El pico de la nueva función de onda se elige a su vez a partir de una distribución de probabilidad, la misma

que habríamos utilizado para predecir la posición que mediríamos para el electrón según su función de onda original. La nueva función de onda está fuertemente concentrada alrededor de este punto central, de modo que la partícula se encuentra ahora esencialmente en un solo lugar en lo que a nosotros, los observadores macroscópicos, se refiere. Los colapsos de la función de onda en los GRW son reales y aleatorios, no inducidos por las mediciones.

La teoría GRW no es una nebulosa de "interpretación" de la mecánica cuántica; es una teoría física completamente nueva, con una dinámica diferente. De hecho, la teoría postula dos nuevas constantes de la naturaleza: el ancho de la función de onda recientemente localizada, y la probabilidad por segundo de que ocurra el colapso dinámico. Los valores realistas de estos parámetros son quizás 10-5 centímetros para el ancho, y 10-16 para la probabilidad de colapso por segundo. Por lo tanto, un electrón típico evoluciona durante ^{1016} segundos antes de que su función de onda se colapse espontáneamente. Eso es alrededor de 300 millones de años. Así que en los 14.000 millones de años de vida del universo observable, la mayoría de los electrones (u otras partículas) se localizan sólo un puñado de veces.

Esa es una característica de la teoría, no un error. Si vas a jugar con la ecuación de Schrödinger, es mejor que lo hagas de tal manera que no arruines todos los maravillosos éxitos de la mecánica cuántica convencional. Hacemos experimentos cuánticos todo el tiempo con partículas individuales o colecciones de unas pocas partículas. Sería desastroso si las funciones de onda de esas partículas siguieran colapsando espontáneamente sobre nosotros. Si hay un elemento verdaderamente aleatorio en la evolución de los sistemas cuánticos, debería ser increíblemente raro para las partículas individuales.

Entonces, ¿cómo es que una alteración tan leve de la teoría logra deshacerse de las superposiciones macroscópicas? El enredo viene al rescate, como lo hizo con la decoherencia en muchos mundos.

Considere la posibilidad de medir el espín de un electrón. A medida que lo pasamos a través de un imán de Stern-Gerlach, la función de onda del electrón evoluciona en una superposición de "desviado hacia arriba" y "desviado hacia abajo". Medimos en qué dirección se fue, por ejemplo, detectando el electrón desviado en una pantalla, que está conectada a un dial con un puntero que indica Arriba o Abajo. Un Everettiano dice que el puntero es un gran objeto macroscópico que se enreda rápidamente con el entorno, lo que lleva a la decoherencia y a la ramificación de la función de la onda. La GRW no puede apelar a tal proceso, pero sucede algo relacionado.

No es que el electrón original colapse espontáneamente; tendríamos que esperar millones de años para que eso se convirtiera en un evento probable. Pero el puntero del aparato contiene algo así como 1024 electrones, protones y neutrones. Todas estas partículas están enredadas de una manera obvia: están en diferentes posiciones dependiendo de si el puntero indica Arriba o Abajo. Aunque es bastante improbable que alguna partícula específica sufra un colapso espontáneo antes de que abramos la caja, las posibilidades de que al menos una de ellas lo haga son muy buenas, ya que debería ocurrir unas ^{108} veces por segundo.

Puede que no te impresiones, pensando que ni siquiera notaríamos un diminuto subconjunto de partículas localizándose en un puntero macroscópico. Pero la magia del enredo significa que si la función de onda de una sola partícula se localiza espontáneamente, el resto de las partículas con las que está enredada vendrán con ella. Si de alguna manera el puntero lograra evitar que alguna de sus partículas se localizara durante un cierto período de tiempo, lo suficiente para que evolucionara en una superposición macroscópica de Arriba y Abajo, esa superposición colapsaría instantáneamente tan pronto como sólo una de las partículas se localizara. La función de onda global pasa muy rápidamente de describir un aparato que apunta a una superposición de dos respuestas a una que es definitivamente una u otra. La teoría GRW logra hacer operativa y objetiva la división clásica/cuántica que los partidarios del enfoque de Copenhague se ven obligados a invocar. El comportamiento clásico se ve en los objetos que contienen tantas partículas que que la función de onda general sufra una serie de colapsos rápidos.

La teoría GRW tiene ventajas y desventajas obvias. La principal ventaja es que es una teoría bien planteada y específica que aborda el problema de la medición de una manera sencilla. Los múltiples mundos del enfoque de Everett son eliminados por una serie de colapsos verdaderamente impredecibles. Nos queda un mundo que mantiene los éxitos de la teoría cuántica en el ámbito microscópico, mientras exhibe el comportamiento clásico macroscópico. Es un relato perfectamente realista que no invoca ninguna noción borrosa sobre la conciencia en su explicación de los resultados experimentales. La GRW puede ser considerada como la mecánica cuántica de Everet, más un proceso aleatorio que corta nuevas ramas de la función de la onda a medida que aparecen.

Además, es experimentalmente comprobable. Los dos parámetros que rigen la anchura de las funciones de onda localizadas y la probabilidad de colapso no se eligieron arbitrariamente; si sus valores fueran muy diferentes, no harían el trabajo (los colapsos serían demasiado raros, o no estarían

suficientemente localizados) o ya habrían sido descartados por el experimento. Imaginemos que tenemos un fluido de átomos en un estado de temperatura increíblemente baja, de modo que cada átomo se mueve muy lentamente, si es que lo hace. Un colapso espontáneo de la función de onda de cualquier electrón en el fluido daría a su átomo una pequeña sacudida de energía, que los físicos podrían detectar como un ligero aumento de la temperatura del fluido. Se están llevando a cabo experimentos de esta forma, con el objetivo final de confirmar o descartar por completo el GRW.

Estos experimentos son más fáciles de decir que de hacer, ya que la cantidad de energía de la que hablamos es muy pequeña. Aún así, el GRW es un gran ejemplo para mencionar cuando tus amigos se quejan de que muchos mundos, o diferentes enfoques de la mecánica cuántica en general, no son experimentales. Se prueban las teorías en comparación con otras teorías, y estas dos son manifiestamente diferentes en sus predicciones empíricas.

Entre las desventajas de la GRW está el hecho de que, bueno, la nueva regla del colapso espontáneo es totalmente ad hoc y está desfasada con todo lo demás que sabemos sobre la física. Parece sospechoso que la naturaleza no sólo elija violar su ley habitual de movimiento a intervalos aleatorios, sino que lo haga de tal manera que no hayamos podido detectarlo experimentalmente.

Otra desventaja, que ha impedido que la GRW y las teorías relacionadas ganen tracción entre los físicos teóricos, es que no está claro cómo construir una versión de la teoría que funcione no sólo para las partículas sino también para los campos. En la física moderna, los bloques de construcción fundamentales de la naturaleza son los campos, no las partículas. Vemos partículas cuando miramos con suficiente atención a los campos vibratorios, simplemente porque esos campos obedecen a las reglas de la mecánica cuántica. Bajo algunas condiciones, es posible pensar que la descripción del campo es útil pero no obligatoria, e imaginar que los campos son sólo formas de seguir el rastro de muchas partículas a la vez. Pero hay otras circunstancias (como en el universo primitivo, o en el interior de los protones y neutrones) en las que la descripción del campo es indispensable. Y GRW, al menos en la versión simple que se presenta aquí, nos da instrucciones sobre cómo colapsan las funciones de onda que se refieren específicamente a la probabilidad por partícula. Esto no es necesariamente un obstáculo insuperable -tomar modelos simples que no funcionan del todo y generalizarlos hasta que lo hagan es el valor de referencia del físico teórico, pero es una señal de que estos enfoques no parecen encajar de forma natural con la forma en que pensamos actualmente sobre las leyes de la naturaleza.

La GRW delinea el límite cuántico/clásico haciendo colapsos espontáneos muy raros para las partículas individuales, pero muy rápidos para las grandes colecciones. Un enfoque alternativo sería hacer que el colapso ocurriera cuando el sistema alcanzara un cierto umbral, como una banda elástica que se rompe cuando se estira demasiado. Un ejemplo bien conocido de un intento en este sentido fue presentado por el físico matemático Roger Penrose, más conocido por su trabajo en relatividad general. La teoría de Penrose utiliza la gravedad de una manera crucial. Sugiere que las funciones de onda se colapsan espontáneamente cuando empiezan a describir superposiciones macroscópicas en las que diferentes componentes tienen campos gravitatorios apreciablemente diferentes. El criterio de "apreciablemente diferente" aquí resulta difícil de especificar con precisión; los electrones individuales no colapsarían por muy extendidas que estuvieran sus funciones de onda, mientras que un puntero es lo suficientemente grande como para causar el colapso tan pronto como comienza a evolucionar en diferentes estados.

La mayoría de los expertos en mecánica cuántica no se han entusiasmado con la teoría de Penrose, en parte porque son escépticos de que la gravedad tenga algo que ver con la formulación fundamental de la mecánica cuántica. Seguramente, piensan, podemos hablar -y lo hicimos, durante la mayor parte de la historia del tema- sobre el colapso de la mecánica cuántica y la función de onda sin considerar la gravedad en absoluto.

Es posible que se pueda desarrollar una versión precisa del criterio de Penrose en la que se piense que es una decoherencia disfrazada: el campo gravitatorio de un objeto puede pensarse como parte de su entorno, y si dos componentes diferentes de la función de onda tienen campos gravitatorios diferentes, se descohacen efectivamente. La gravedad es una fuerza extremadamente débil, y casi siempre se dará el caso de que las interacciones electromagnéticas ordinarias causen la decoherencia mucho antes de que lo haga la gravedad. Pero lo bueno de la gravedad es que es universal (todo tiene un campo gravitatorio, no todo está cargado eléctricamente), así que al menos esta sería una forma de garantizar que la función de onda colapsaría para cualquier objeto macroscópico. Por otro lado, ramificarse cuando se produce la decoherencia ya forma parte del enfoque de muchos mundos; todo lo que este tipo de teoría del colapso espontáneo diría es "Es como Everett, excepto que cuando se crean nuevos mundos, los borramos a mano". ¿Quién sabe? Puede que sea así como funciona la naturaleza, pero no es una ruta que la mayoría de los físicos se animen a seguir.

Desde el principio de la mecánica cuántica, una posibilidad obvia a contemplar ha sido la idea de que la función de onda no es toda la historia, sino que también hay otras variables físicas además de ella. Después de todo, los físicos estaban muy acostumbrados a pensar en términos de distribuciones de probabilidad a partir de su experiencia con la mecánica estadística, tal como se había desarrollado en el siglo XIX. No especificamos la posición exacta y la velocidad de cada átomo en una caja de gas, sólo sus propiedades estadísticas generales. Pero en la visión clásica damos por sentado que hay una posición y velocidad exactas para cada partícula, incluso si no la conocemos. Tal vez la mecánica cuántica es así: hay cantidades definidas asociadas con resultados de observación prospectivos, pero no sabemos cuáles son, y la función de onda de alguna manera captura parte de la realidad estadística sin contar toda la historia.

Sabemos que la función de onda no puede ser exactamente como una distribución de probabilidad clásica. Una verdadera distribución de probabilidad asigna probabilidades directamente a los resultados, y la probabilidad de cualquier evento dado tiene que ser un número real entre cero y uno (inclusive). Una función de onda, por su parte, asigna una amplitud a cada posible resultado, y las amplitudes son números complejos. Tienen una parte real y otra imaginaria, y cualquiera de ellas puede ser positiva o negativa. Cuando cuadramos esas amplitudes obtenemos una distribución de probabilidad, pero si queremos explicar lo que se observa experimentalmente, no podemos trabajar directamente con esa distribución en lugar de mantener la función de onda. El hecho de que las amplitudes puedan ser negativas permite la interferencia que vemos en el experimento de la doble rendija, por ejemplo.

Hay una forma sencilla de abordar este problema: piense en la función de onda como una cosa real, físicamente existente (no sólo un resumen conveniente de nuestro conocimiento incompleto), pero *también imagine* que hay variables adicionales, quizás representando las posiciones de las partículas. Estas cantidades adicionales se denominan convencionalmente *variables ocultas*, aunque a algunos defensores de este enfoque no les gusta la etiqueta, ya que son estas variables las que realmente observamos cuando hacemos una medición. Podemos llamarlas simplemente partículas, ya que ese es el caso que normalmente se considera. La función de onda entonces asume el papel de una onda *piloto*, guiando a las partículas mientras se mueven. Es como si las partículas fueran pequeños barriles flotantes, y la función de onda describe ondas y corrientes en el agua que empujan los barriles. La función de onda obedece a la ecuación ordinaria de Schrödinger, mientras que una nueva "ecuación guía" rige la forma en que influye en las partículas. Las partículas son guiadas hasta donde la función de onda es grande, y lejos de donde es casi cero.

La primera de estas teorías fue presentada por Louis de Broglie, en la Conferencia de Solvay de 1927. Tanto Einstein como Schrödinger pensaban de manera similar en ese momento. Pero las ideas de de Broglie fueron duramente criticadas en Solvay, por Wolfgang Pauli en particular. De las actas de la conferencia, parece que las críticas de Pauli estaban fuera de lugar, y de Broglie las respondió correctamente. Pero la acogida le desanimó lo suficiente como para que de Broglie abandonara la idea.

En un famoso libro de 1932, Fundamentos matemáticos *de la mecánica cuántica,* John von Neumann demostró un teorema sobre la dificultad de construir teorías de variables ocultas. Von Neumann fue uno de los matemáticos y físicos más brillantes del siglo XX, y su nombre gozó de una enorme credibilidad entre los investigadores de la mecánica cuántica. Se convirtió en una práctica habitual, siempre que alguien sugería que podría haber una forma más definida de formular la teoría cuántica que la vaguedad inherente al enfoque de Copenhague, que alguien invocara el nombre de von Neumann y la existencia de su prueba. Eso aplastaría cualquier discusión en ciernes.

De hecho, lo que von Neumann había probado era algo un poco menos de lo que la mayoría de la gente suponía (a menudo sin leer su libro, que no fue traducido al inglés hasta 1955). Un buen teorema matemático establece un resultado que se desprende de suposiciones claramente establecidas. Sin embargo, cuando queremos invocar tal teorema para que nos enseñe algo sobre el mundo real, tenemos que tener mucho cuidado de que las suposiciones sean realmente verdaderas en la realidad. Von Neumann hizo suposiciones que, en retrospectiva, no tenemos que hacer si nuestra tarea es inventar una teoría que reproduzca las predicciones de la mecánica cuántica. Probó algo, pero lo que probó no fue "las teorías de las variables ocultas no pueden funcionar". Esto fue señalado por la matemática y filósofa Grete Hermann, pero su trabajo fue en gran parte ignorado.

Llegó David Bohm, una interesante y complicada figura en la historia de la mecánica cuántica. Como estudiante graduado a principios de los 40, Bohm se interesó en la política de izquierdas. Terminó trabajando en el Proyecto Manhattan, pero se vio obligado a hacer su trabajo en Berkeley, ya

que se le negó la autorización de seguridad necesaria para trasladarse a Los Álamos. Después de la guerra se convirtió en profesor asistente en Princeton, y publicó un influyente libro de texto sobre mecánica cuántica. En ese libro se adhirió cuidadosamente al enfoque recibido de Copenhague, pero pensar en los temas le hizo empezar a preguntarse sobre las alternativas.

El interés de Bohm en estas cuestiones fue alentado por una de las pocas figuras que tuvo la estatura de enfrentarse a Bohr y sus colegas: El propio Einstein. El gran hombre había leído el libro de Bohm, y convocó al joven profesor a su oficina para hablar de los fundamentos de la teoría cuántica. Einstein explicó sus objeciones básicas, que la mecánica cuántica no podía considerarse una visión completa de la realidad, y animó a Bohm a pensar más profundamente en la cuestión de las variables ocultas, lo que procedió a hacer.

Todo esto ocurrió mientras Bohm estaba bajo una nube de sospecha política, en un momento en que la asociación con el comunismo podía arruinar la carrera de la gente. En 1949, Bohm había testificado ante el Comité de Actividades Antiamericanas de la Cámara de Representantes, donde se negó a implicar a ninguno de sus antiguos colegas. En 1950 fue arrestado en su oficina de Princeton por desacato al Congreso. Aunque finalmente fue absuelto de todos los cargos, el presidente de la universidad le prohibió poner un pie en el campus, y presionó al departamento de física para que no renovara su contrato. En 1951, con el apoyo de Einstein y Oppenheimer, Bohm pudo finalmente encontrar un trabajo en la Universidad de São Paulo, y se fue a Brasil. Por eso el primer seminario en Princeton para explicar las ideas de Bohm tuvo que ser impartido por otra persona.

Nada de este drama impidió a Bohm pensar productivamente en la mecánica cuántica. Alentado por Einstein, desarrolló una teoría similar a la de de Broglie, en la que las partículas se guiaban por un "potencial cuántico" construido a partir de la función de onda. Hoy en día este enfoque se conoce a menudo como la *teoría de de Broglie-Bohm*, o simplemente mecánica de *Bohmian*. La presentación de la teoría de Bohm fue un poco más detallada que la de de Broglie, especialmente cuando se trataba de describir el proceso de medición.

Incluso hoy en día, a veces se oye a los físicos profesionales decir que es imposible construir una teoría de variables ocultas que reproduzca las predicciones de la mecánica cuántica, "debido al teorema de Bell". Pero eso es exactamente lo que hizo Bohm, al menos para el caso de las partículas no relativistas. John Bell, de hecho, fue uno de los pocos físicos que quedó extremadamente impresionado por el trabajo de Bohm, y se inspiró en el desarrollo de su teorema precisamente para entender cómo reconciliar la existencia de la mecánica de Bohm con el supuesto teorema de no-variables de von Neumann.

Lo que el teorema de Bell prueba en realidad es la imposibilidad de reproducir la mecánica cuántica a través de una teoría *local* de variables ocultas. Tal teoría es lo que Einstein había estado esperando durante mucho tiempo: un modelo que uniera la realidad independiente a las cantidades físicas asociadas con lugares específicos en el espacio, con efectos entre ellos que se propagaran a la velocidad de la luz o por debajo de ella. La mecánica de Bohmian es perfectamente determinista, pero es decididamente no local. Las partículas separadas pueden afectarse entre sí instantáneamente.

La mecánica de Bohmian postula tanto un conjunto de partículas con posiciones definidas (pero desconocidas para nosotros, hasta que son observadas), como una función de onda separada. La función de onda evoluciona exactamente de acuerdo con la ecuación de Schrödinger - ni siquiera parece reconocer que las partículas están allí, y no se ve afectada por lo que están haciendo. Las partículas, mientras tanto, son empujadas de acuerdo con una ecuación guía que depende de la función de onda. Sin embargo, la forma en que una partícula es guiada no sólo depende de la función de onda sino también de las posiciones de *todas las demás partículas* que pueden estar en el sistema. Esa es la no-localidad; el movimiento de una partícula aquí puede depender, en principio, de las posiciones de otras partículas arbitrariamente lejanas. Como el mismo Bell lo expresó más tarde, en la mecánica de Bohmian "la paradoja Einstein-Podolsky-Rosen se resuelve de la manera que menos le hubiera gustado a Einstein".

Esta no-localidad juega un papel crucial en la comprensión de cómo la mecánica de Bohmian reproduce las predicciones de la mecánica cuántica ordinaria. Consideremos el experimento de la doble rendija, que ilustra tan vívidamente cómo los fenómenos cuánticos son simultáneamente ondulatorios (vemos patrones de interferencia) y particulados (vemos puntos en la pantalla del detector, y la interferencia desaparece cuando detectamos por qué rendija pasan las partículas). En la mecánica de Bohmian esta ambigüedad no es en absoluto misteriosa: hay tanto partículas como ondas.

Las partículas son lo que observamos; la función de onda afecta a su movimiento, pero no tenemos forma de medirlo directamente.

Según Bohm, la función de onda evoluciona a través de ambas rendijas como lo haría en la mecánica cuántica de Everet. En particular, habrá efectos de interferencia donde la función de onda se añade o se cancela una vez que llega a la pantalla. Pero no vemos la función de onda en la pantalla; vemos partículas individuales que la golpean. Las partículas son empujadas por la función de onda, de modo que es más probable que golpeen la pantalla cuando la función de onda es grande, y menos probable que lo hagan cuando es pequeña.

La regla de Born nos dice que la probabilidad de observar una partícula en un lugar determinado viene dada por la función de onda al cuadrado. En la superficie, esto parece difícil de reconciliar con la idea de que las posiciones de las partículas son variables completamente independientes que podemos especificar como queramos. Y la mecánica de Bohmian es perfectamente determinista: no hay ningún evento verdaderamente aleatorio, como ocurre con los colapsos espontáneos de la teoría GRW. Entonces, ¿de dónde viene la regla de Born?

La respuesta es que, si bien en principio las posiciones de las partículas podrían estar en cualquier lugar, en la práctica existe una distribución natural para que las mismas tengan. Imaginemos que tenemos una función de onda y un número fijo de partículas. Para recuperar la regla de Born, todo lo que tenemos que hacer es empezar con una distribución de esas partículas similar a la de la regla de Born. Es decir, tenemos que distribuir las posiciones de nuestras partículas de manera que la distribución parezca que fue elegida al azar con la probabilidad dada por la función de onda al cuadrado. Más partículas donde la amplitud es grande, menos partículas donde es pequeña.

Tal distribución de "equilibrio" tiene la agradable característica de que la regla de Born sigue siendo válida a medida que pasa el tiempo y el sistema evoluciona. Si comenzamos nuestras partículas en una distribución de probabilidad que coincida con lo que esperamos de la mecánica cuántica ordinaria, continuará coincidiendo con esa expectativa en el futuro. Muchos bohmianos creen que una distribución inicial de no-equilibrio evolucionará hacia el equilibrio, de la misma manera que un gas de partículas clásicas en una caja evoluciona hacia un estado térmico de equilibrio; pero el estado de esta idea aún no está establecido. Las probabilidades resultantes se refieren, por supuesto, a nuestro conocimiento del sistema más que a las frecuencias objetivas; si de alguna manera supiéramos exactamente cuáles son las posiciones de las partículas, en lugar de sólo su distribución, podríamos predecir los resultados experimentales con exactitud sin necesidad de probabilidades en absoluto.

Esto pone a la mecánica de Bohmian en una posición interesante como una formulación alternativa de la mecánica cuántica. La teoría de la GRW coincide con las expectativas cuánticas tradicionales normalmente, pero también hace predicciones definitivas para nuevos fenómenos que pueden ser probados. Al igual que la GRW, la mecánica de Bohmian es inequívocamente una teoría física diferente, no simplemente una "interpretación". No *tiene* que obedecer la regla de Born si por alguna razón la posición de nuestras partículas no está en equilibrio. Pero obedecerá la regla si lo están. Y si ese es el caso, las predicciones de la mecánica de Bohmian son estrictamente indistinguibles de las de la teoría cuántica ordinaria. En particular, veremos más partículas golpear la pantalla donde la función de onda es grande, y menos donde es pequeña.

Todavía tenemos la pregunta de qué pasa cuando miramos para ver por qué ranura ha pasado la partícula. Las funciones de onda no colapsan en la mecánica de Bohmian; como en el caso de Everett, siempre obedecen a la ecuación de Schrödinger. Entonces, ¿cómo se supone que vamos a explicar la desaparición del patrón de interferencia en el experimento de la doble rendija?

La respuesta es "de la misma manera que lo hacemos en muchos mundos". Mientras que la función de onda no colapsa, sí evoluciona. En particular, debemos considerar la función de onda para el aparato de detección así como para los electrones que pasan por las rendijas; el mundo de Bohmian es completamente cuántico, no se rebaja a una división artificial entre los reinos clásico y cuántico. Como sabemos al pensar en la decoherencia, la función de onda para el detector se enredará con la de un electrón que pasa por la rendija, y se producirá una especie de "ramificación". La diferencia es que las variables que describen el aparato (que no existen en muchos mundos) estarán en lugares correspondientes a una de estas ramas, y no a la otra. A todos los efectos, es como si la función de onda se hubiera colapsado; o, si se prefiere, es como si la decoherencia hubiera ramificado la función de onda, pero en lugar de asignar la realidad a cada una de las ramas, las partículas de las que estamos hechos sólo están localizadas en una rama particular.

No se sorprenderá al escuchar que muchos Everettianos tienen dudas sobre este tipo de historias. Si la función de onda del universo simplemente obedece a la ecuación de Schrödinger, sufrirá decoherencia y ramificación. Y ya has admitido que la función de onda es parte de la realidad. Las posiciones de las partículas, para el caso, no tienen ninguna influencia en cómo evoluciona la función de onda. Todo lo que hacen, podría decirse, es apuntar a una rama particular de la función de onda y

decir, "Esta es la verdadera". Por lo tanto, algunos Everettianos han afirmado que la mecánica de Bohmian no es realmente diferente de la de Everett, sólo incluye algunas variables extra superfluas que no sirven para nada más que para calmar algunas ansiedades sobre la división en múltiples copias de nosotros mismos. Como dijo Deutsch: "Las teorías de las ondas piloto son teorías de universos paralelos en un estado de negación crónica".

No vamos a adjudicar esta disputa aquí mismo. Lo que está claro es que la mecánica de Bohmian es una construcción explícita que hace lo que muchos físicos pensaban que era imposible: construir una teoría determinista precisa que reproduzca todas las predicciones de la mecánica cuántica de los libros de texto, sin requerir ningún encantamiento misterioso sobre el proceso de medición o una distinción entre los reinos cuántico y clásico. El precio que pagamos es la no localización explícita en la dinámica.

Bohm tenía la esperanza de que su nueva teoría fuera ampliamente apreciada por los físicos. Esto no iba a ser así. En el emotivo lenguaje que tan a menudo acompaña a las discusiones sobre los fundamentos cuánticos, Heisenberg llamó a la teoría de Bohm "una superestructura ideológica superflua", mientras que Pauli se refirió a ella como "metafísica artificial". Ya hemos escuchado el juicio de Oppenheimer, quien previamente había sido el mentor y partidario de Bohm. Einstein parece haber apreciado el esfuerzo de Bohm, pero pensó que la construcción final era artificial y poco convincente. Sin embargo, a diferencia de de Broglie, Bohm no cedió a la presión y continuó desarrollando y defendiendo su teoría. De hecho, su defensa inspiró al propio de Broglie, que todavía estaba en activo (murió en 1987). En sus últimos años, de Broglie volvió a las teorías de las variables ocultas, desarrollando y elaborando su modelo original.

Incluso aparte de la presencia de la no-localidad explícita y la acusación de que la teoría es sólo muchos mundos en negación, hay otros problemas significativos inherentes a la mecánica de Bohmian, especialmente desde la perspectiva de un físico fundamental moderno. La lista de ingredientes de la teoría es indudablemente más complicada que en Everett, y el espacio de Hilbert, el conjunto de todas las funciones de onda posibles, es tan grande como siempre. La posibilidad de muchos mundos no se evita borrando los mundos (como en GRW), sino simplemente negando que sean reales. La forma en que funciona la dinámica de Bohmian está lejos de ser elegante. Mucho después de que la mecánica clásica fuera superada, los físicos todavía se aferran intuitivamente a algo como la tercera ley de Newton: si una cosa empuja a otra, la segunda cosa empuja hacia atrás. Por lo tanto, parece extraño que tengamos partículas que son empujadas por una función de onda, mientras que la función de onda no se ve afectada en absoluto por las partículas. Por supuesto, la mecánica cuántica nos obliga inevitablemente a enfrentarnos a cosas extrañas, así que quizás esta consideración no debería ser primordial.

Más importante aún, las formulaciones originales de de Broglie y Bohm se basan en gran medida en la idea de que lo que realmente existe son "partículas". Al igual que con la GRW, esto crea un problema cuando tratamos de entender los mejores modelos del mundo que tenemos en realidad, que son teorías de campo cuántico. La gente ha propuesto formas de "Bohmizar" la teoría de campos cuánticos, y ha habido algunos éxitos - los físicos pueden ser extremadamente inteligentes cuando quieren serlo. Pero los resultados se sienten forzados más que naturales. No significa que estén necesariamente equivocados, pero es un golpe contra las teorías de Bohmian cuando se comparan con Muchos Mundos, donde incluir campos o gravedad cuántica es sencillo.

En nuestra discusión sobre la mecánica de Bohmian nos referimos a la posición de las partículas, pero no a su momento. Esto se remonta a los días de Newton, que pensaba que las partículas tenían una posición en cada momento del tiempo, y la velocidad (y el momento) se derivaban de esa trayectoria, calculando su tasa de cambio. Las formulaciones más modernas de la mecánica clásica (bueno, desde 1833) tratan la posición y el momento en igualdad de condiciones. Una vez que pasamos a la mecánica cuántica, esta perspectiva se refleja en el principio de incertidumbre de Heisenberg, en el que la posición y el momento aparecen exactamente de la misma manera. La mecánica de Bohmian deshace este movimiento, tratando la posición como primaria, y el momento como algo que se deriva de él. Pero resulta que no se puede medir con exactitud, debido a los efectos inevitables de la función de onda en las posiciones de las partículas a lo largo del tiempo. Así que al final del día, el principio de incertidumbre sigue siendo cierto en la mecánica de Bohmian como un hecho práctico de la vida, pero no tiene la naturalidad automática de las teorías en las que la función de onda es la única entidad real.

Hay un principio más general en juego aquí. La simplicidad de Muchos Mundos también lo hace extremadamente flexible. La ecuación de Schrödinger toma la función de onda y calcula la velocidad

de su evolución aplicando el Hamiltoniano, que mide las diferentes cantidades de energía en diferentes componentes del estado cuántico. Si me das un Hamiltoniano, puedo entender instantáneamente la versión Everettiana de su correspondiente teoría cuántica. Partículas, giros, campos, supercuerdas, no importa. Muchos Mundos es plug-and-play.

Otros enfoques requieren mucho más trabajo que eso, y no está nada claro que el trabajo sea siquiera factible. Hay que especificar no sólo un Hamiltoniano, sino también una forma particular en que las funciones de onda se colapsan espontáneamente, o un nuevo conjunto particular de variables ocultas para seguir el rastro. Es más fácil decirlo que hacerlo. El problema se vuelve aún más pronunciado cuando pasamos de la teoría de campos cuánticos a la gravedad cuántica (que, recuerden, fue una de las motivaciones iniciales de Everett). En la gravedad cuántica la propia noción de "una ubicación en el espacio" se vuelve problemática, ya que las diferentes ramas de la función de onda tendrán diferentes geometrías espacio-temporales. Para muchos mundos eso no es un problema; para las alternativas está cerca de un desastre.

Cuando Bohm y Everett inventaban sus alternativas a Copenhague en los años 50, o Bell probaba sus teoremas en los 60, el trabajo sobre los fundamentos de la mecánica cuántica fue rechazado dentro de la comunidad de la física. Eso comenzó a cambiar un poco con la llegada de la teoría de la decoherencia y la información cuántica en los años 70 y 80; la teoría GRW fue propuesta en 1985. Aunque este subcampo sigue siendo considerado con sospecha por una gran mayoría de los físicos (por un lado, tiende a atraer a los filósofos), desde el decenio de 1990 se ha realizado una enorme cantidad de trabajo interesante e importante, en gran parte a la intemperie. Sin embargo, también es seguro decir que gran parte del trabajo contemporáneo sobre los fundamentos cuánticos todavía tiene lugar en un contexto de qubits o partículas no relativistas. Una vez que nos graduamos en campos cuánticos y gravedad cuántica, algunas cosas que antes podíamos dar por sentadas ya no están disponibles. Así como es hora de que la física como campo tome en serio los fundamentos cuánticos, es hora de que los fundamentos cuánticos tomen en serio la teoría del campo y la gravedad.

Al contemplar las formas de eliminar los muchos mundos que implica una versión barata del formalismo cuántico subyacente, hemos explorado la posibilidad de cortar los mundos mediante un evento aleatorio (GRW) o de alcanzar algún tipo de umbral (Penrose) o de elegir determinados mundos como reales añadiendo variables adicionales (de Broglie-Bohm). ¿Qué queda?

El problema es que la aparición de múltiples ramas de la función de onda es automática una vez que creemos en las funciones de onda y en la ecuación de Schrödinger. Así que las alternativas que hemos considerado hasta ahora o bien eliminan esas ramas o bien plantean algo que escoge una de ellas como especial.

Una tercera vía se sugiere a sí misma: negar por completo la realidad de la función de onda.

Con esto no queremos negar la importancia central de las funciones de onda en la mecánica cuántica. Más bien, podemos usar las funciones de onda, pero no podemos afirmar que representan parte de la realidad. Podrían simplemente caracterizar nuestro conocimiento; en particular, el conocimiento incompleto que tenemos sobre el resultado de futuras mediciones cuánticas. Esto se conoce como el enfoque "epistémico" de la mecánica cuántica, ya que considera que las funciones de onda captan algo de lo que conocemos, en contraposición a los enfoques "ontológicos" que tratan la función de onda como una descripción de la realidad objetiva. Dado que las funciones de onda se suelen denotar con la letra griega Ψ (Psi), los defensores de los enfoques epistémicos de la mecánica cuántica a veces se burlan de los evertianos y de otros realistas de las funciones de onda llamándolos "Psi-ontólogos".

Ya hemos observado que una estrategia epistémica no puede funcionar de la manera más ingenua y directa. La función de onda no es una distribución de probabilidad; las distribuciones de probabilidad reales nunca son negativas, por lo que no pueden dar lugar a fenómenos de interferencia como los que observamos en el experimento de la doble rendija. Sin embargo, en lugar de rendirnos, podemos tratar de ser un poco más sofisticados en la forma en que pensamos acerca de la relación entre la función de onda y el mundo real. Podemos imaginarnos la creación de un formalismo que nos permita utilizar las funciones de onda para calcular las probabilidades asociadas a los resultados experimentales, sin adjuntarles ninguna realidad subyacente. Esta es la tarea que asumen los enfoques epistémicos.

Ha habido muchos intentos de interpretar la función de onda de forma epistémica, al igual que hay modelos de colapso o teorías de variables ocultas que compiten entre sí. Una de las más prominentes es el Bayesianismo Cuántico, desarrollado por Christopher Fuchs, Rüdiger Schack, Carlton Caves, N.

David Mermin, y otros. Hoy en día la etiqueta se acorta típicamente a QBism y se pronuncia "cubismo". (Uno debe admitir que es un nombre encantador.)

La inferencia bayesiana sugiere que todos llevamos con nosotros un conjunto de credenciales para que varias proposiciones sean verdaderas o falsas, y que actualizamos esas credenciales cuando llega nueva información. Todas las versiones de la mecánica cuántica (y de hecho todas las teorías científicas) utilizan el teorema de Bayes en una u otra versión, y en muchos enfoques para comprender la probabilidad cuántica desempeña un papel crucial. El QBism se distingue por hacer que nuestras credenciales cuánticas sean *personales*, en lugar de universales. Según el QBism, la función de onda de un electrón no es una cosa de una vez por todas en la que todo el mundo podría, en principio, estar de acuerdo. Más bien, cada uno tiene su propia idea de lo que es la función de onda del electrón, y usa esa idea para hacer predicciones sobre los resultados de la observación. Si hacemos muchos experimentos y hablamos entre nosotros sobre lo que hemos observado, afirman los QBistas, llegaremos a un grado de consenso sobre cuáles son las diversas funciones de onda. Pero son fundamentalmente medidas de nuestra creencia personal, no características objetivas del mundo. Cuando vemos un electrón desviado hacia arriba en un campo magnético de Stern-Gerlach, el mundo no cambia, pero hemos aprendido algo nuevo sobre él.

Hay una ventaja inmediata e innegable de tal filosofía: si la función de la onda no es una cosa física, no hay necesidad de preocuparse por su "colapso", incluso si ese colapso es supuestamente no local. Si Alice y Bob poseen dos partículas que están enredadas entre sí y Alice hace una medición, según las reglas ordinarias de la mecánica cuántica el estado de la partícula de Bob cambia instantáneamente. El QBism nos asegura que no tenemos que preocuparnos por eso, ya que no existe tal cosa como "el estado de la partícula de Bob". Lo que cambió fue la función de onda que Alice lleva consigo para hacer predicciones: fue actualizada usando una versión cuántica adecuada del teorema de Bayes. La función de onda de Bob no cambió en absoluto. El QBism ordena las reglas del juego para que cuando Bob se ponga a medir su partícula, el resultado concuerde con la predicción que haríamos en base al resultado de la medición de Alice. Pero no hay necesidad de imaginar que cualquier cantidad física haya cambiado en la ubicación de Bob. Todos esos cambios son estados de conocimiento de diferentes personas, que después de todo están localizados en sus cabezas, no se extienden por todo el espacio.

Pensar en la mecánica cuántica en términos de QBist ha llevado a interesantes desarrollos en las matemáticas de la probabilidad, y ofrece una visión de la teoría de la información cuántica. La mayoría de los físicos, sin embargo, aún querrán saber: ¿Qué se supone que es la realidad en este punto de vista? (Abraham Pais recordó que Einstein una vez le preguntó si "realmente creía que la Luna existe sólo cuando la miro").

La respuesta no es clara. Imagine que enviamos un electrón a través de un imán de Stern-Gerlach, pero elegimos no mirar si se desvía hacia arriba o hacia abajo. Para un Everettiano, es sin embargo el caso de que la decoherencia y la ramificación se ha producido, y hay un hecho de la materia acerca de qué rama cualquier copia particular de nosotros está en. El QBist dice algo muy diferente: no existe tal cosa como si el giro fue desviado hacia arriba o hacia abajo. Todo lo que tenemos es nuestro grado de creencia sobre lo que veremos cuando finalmente decidamos mirar. No hay cuchara, como Neo aprendió en *The Matrix*. Preocuparse por la "realidad" de lo que está pasando antes de mirar, en este punto de vista, es un error que lleva a todo tipo de confusión.

Los QBistas, en su mayoría, no hablan de lo que el mundo es realmente. O al menos, como un programa de investigación en curso, los QBistas han elegido no insistir demasiado en las cuestiones relativas a la naturaleza de la realidad sobre la que el resto de nosotros nos preocupamos tanto. Los ingredientes fundamentales de la teoría son un conjunto de *agentes*, que tienen *creencias* y acumulan *experiencias*. La mecánica cuántica, según esta visión, es una forma de que los agentes organicen sus creencias y las actualicen a la luz de nuevas experiencias. La idea de un agente es absolutamente central; esto está en claro contraste con las otras formulaciones de la teoría cuántica que hemos estado discutiendo, según las cuales los observadores son sólo sistemas físicos como cualquier otra cosa.

A veces los QBistas hablarán de la realidad como algo que surge cuando hacemos observaciones. Mermin ha escrito, "Hay de hecho un mundo externo común además de los muchos mundos externos personales distintos. Pero ese mundo común debe ser entendido a nivel fundacional para ser una construcción mutua que todos nosotros hemos reunido a partir de nuestras distintas experiencias privadas, usando nuestro invento humano más poderoso: el lenguaje". La idea no es que no haya realidad, sino que la realidad es más de lo que puede ser capturada por cualquier perspectiva aparentemente objetiva de tercera persona. Fuchs ha denominado esta visión *Realismo Participativo*: la realidad es la totalidad emergente de lo que experimentan los diferentes observadores.

El QBism es relativamente joven en cuanto a los enfoques de los fundamentos cuánticos, y hay mucho desarrollo aún por hacer. Es posible que se encuentre con obstáculos insuperables, y el interés en las ideas se desvanezca. También es posible que los conocimientos del QBism puedan ser

interpretados como una forma a veces útil de hablar de las experiencias de los observadores dentro de alguna otra versión, directamente realista, de la mecánica cuántica. Y finalmente, podría ser que el QBismo o algo cercano a él represente una verdadera y revolucionaria forma de pensar sobre el mundo, una que ponga a agentes como tú y yo en el centro de nuestra mejor descripción de la realidad.

Personalmente, como alguien que se siente bastante cómodo con muchos mundos (aunque reconoce que todavía tenemos preguntas abiertas), todo esto me parece una increíble cantidad de esfuerzo dedicado a resolver problemas que no están realmente ahí. Los QBistas, para ser justos, sienten un nivel similar de exasperación con Everett: Mermin ha dicho que "QBism considera [la ramificación en muchos mundos existentes simultáneamente] como la *reductio ad absurdum* de la cosificación del estado cuántico". Esa es la mecánica cuántica para ti, donde el absurdo de una persona es la respuesta de otra a todas las preguntas de la vida.

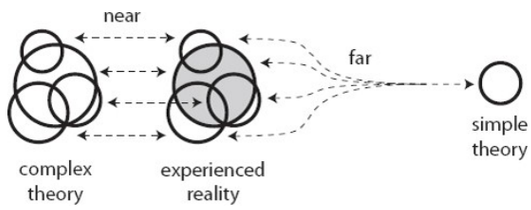
La comunidad de los fundamentos de la física, que está llena de gente inteligente que ha pensado mucho sobre estos temas, no ha llegado a un consenso sobre el mejor enfoque de la mecánica cuántica. Una de las razones es que las personas llegan al problema desde diferentes orígenes y, por lo tanto, con diferentes preocupaciones en sus mentes. Los investigadores en física fundamental - teoría de las partículas, relatividad general, cosmología, gravedad cuántica - tienden a favorecer el enfoque de Everett, si se dignan a tomar una posición sobre los fundamentos cuánticos. Eso es porque "Muchos Mundos" es extremadamente robusto para el material físico subyacente que está describiendo. Si me das un conjunto de partículas y campos y lo que tienes, y las reglas de cómo interactúan, y es sencillo encajar esos elementos en una imagen Everettiana. Otros enfoques tienden a ser más persistentes, exigiendo que empecemos desde cero para averiguar lo que la teoría realmente dice en cada nueva instancia. Si eres alguien que admite que no sabemos realmente cuál es la teoría subyacente de las partículas y los campos y el espacio tiempo, suena agotador, mientras que Muchos Mundos es un lugar natural de descanso fácil. Como ha dicho David Wallace, "La interpretación de Everett (en la medida en que es filosóficamente aceptable) es la única estrategia interpretativa actualmente adecuada para dar sentido a la física cuántica tal y como la encontramos".

Pero hay otra razón, más basada en el estilo personal. Esencialmente todos están de acuerdo en que las ideas simples y elegantes deben ser buscadas en la búsqueda de explicaciones científicas. Ser simple y elegante no significa que una idea sea correcta - eso lo deciden los datos - pero cuando hay múltiples ideas compitiendo por la supremacía y aún no tenemos suficientes datos para elegir entre ellas, es natural dar un poco más de crédito a las más simples y elegantes.

La pregunta es, ¿quién decide qué es simple y elegante? Hay diferentes sentidos para estos términos. La mecánica cuántica de Everet es absolutamente simple y elegante desde cierto punto de vista. Una función de onda en suave evolución, eso es todo. Pero el resultado de estos elegantes postulados -un árbol proliferante de múltiples universos- es discutiblemente no muy simple en absoluto.

La mecánica de Bohmian, por otro lado, está construida de una manera algo aleatoria. Hay tanto partículas como funciones de onda, e interactúan a través de una ecuación de guía no local que parece poco elegante. Incluir tanto las partículas como las funciones de onda como ingredientes fundamentales es, sin embargo, una estrategia natural a contemplar, una vez que nos hemos enfrentado a las demandas experimentales básicas de la mecánica cuántica. La materia actúa a veces como ondas y a veces como partículas, por lo que invocamos tanto a las ondas como a las partículas. La teoría GRW, mientras tanto, añade una extraña modificación estocástica ad hoc a la ecuación de Schrödinger. Pero podría decirse que es la forma más simple y de fuerza bruta de implementar físicamente el hecho de que las funciones de las ondas parecen colapsar.

Hay un contraste útil que se puede dibujar entre la simplicidad de una teoría física y la simplicidad con la que esa teoría se mapea en la realidad tal como la observamos. En términos de ingredientes básicos, Muchos Mundos es incuestionablemente tan simple como se puede. Pero la distancia entre lo que dice la teoría en sí misma (funciones de onda, ecuación de Schrödinger) y lo que observamos en el mundo (partículas, campos, espacio tiempo, personas, sillas, estrellas, planetas) parece enorme. Otros enfoques podrían ser más barrocos en sus principios subyacentes, pero está relativamente claro cómo explican lo que vemos.



Tanto la sencillez subyacente como la cercanía a los fenómenos son virtudes en sí mismas, pero es difícil saber cómo equilibrarlas entre sí. Aquí es donde entra en juego el estilo personal. Todos los enfoques de la mecánica cuántica que hemos considerado se enfrentan a desafíos inminentes al contemplar su desarrollo en fundamentos sólidos como una roca para la comprensión del mundo físico. Así que cada uno de nosotros tiene que hacer un juicio personal sobre cuál de estos problemas se resolverá finalmente, y cuál será fatal para los diversos enfoques. Eso está bien; de hecho, es crucial que las diferentes personas juzguen de manera diferente sobre estos juicios acerca de cómo avanzar. Eso nos da la mejor oportunidad de mantener vivas las múltiples ideas, maximizando la probabilidad de que finalmente hagamos las cosas bien.

Muchos Mundos ofrece una perspectiva de la mecánica cuántica que no sólo es simple y elegante en su núcleo, sino que parece estar preparada para adaptarse a la continua búsqueda de comprensión de la teoría cuántica de campos y la naturaleza del espacio tiempo. Eso es suficiente para convencerme de que debo aprender a vivir con la molestia de que se produzcan otras copias de mí todo el tiempo. Pero si resulta que un enfoque alternativo responde a nuestras preguntas más profundas de manera más efectiva, con gusto cambiaré de opinión.

10

El lado humano

Vivir y pensar en un universo cuántico

En el curso de una larga vida, cada uno de nosotros ocasionalmente se encontrará con una difícil decisión que debe tomar. ¿Mantenerse soltero o casarse? ¿Ir a correr o comer otra rosquilla? ¿Ir a la escuela de posgrado o entrar en el mundo real?

¿No sería bueno poder elegir ambos lados, en lugar de elegir uno? La mecánica cuántica sugiere una estrategia: siempre que tengas que tomar una decisión, puedes hacerlo consultando un generador de números aleatorios cuánticos. De hecho, hay una aplicación disponible para iPhones llamada Universe Splitter que puede ser usada para este mismo propósito. (Como dice Dave Barry, juro que no me lo estoy inventando.)

Digamos que tienes que tomar una decisión: "¿Debo poner pepperoni o salchicha en mi pizza?" (Y digamos que tienes demasiada restricción para dar la respuesta obvia de pedir ambos en la misma pizza.) Puedes activar el Divisor de Universo, donde verás dos cajas de texto, en las que puedes escribir "pepperoni" y "salchicha". Luego presiona el botón, y tu teléfono enviará una señal a través de Internet a un laboratorio en Suiza, donde un fotón es enviado hacia un divisor de rayos (esencialmente un espejo parcialmente plateado que refleja algunos fotones y deja pasar otros). De acuerdo con la ecuación de Schrödinger, el divisor de rayos convierte la función de onda del fotón en dos componentes que van a la izquierda y a la derecha, cada uno de los cuales se dirige hacia un detector diferente. Cuando cualquiera de los dos detectores nota un fotón, produce una lectura que se enreda con el entorno, lo que lleva rápidamente a la decoherencia y ramifica la función de onda en dos. La copia de usted en la rama donde el fotón se fue a la izquierda ve su teléfono parpadear con el mensaje "pepperoni", y en la que se fue a la derecha, ven "salchicha". Si cada uno de ellos realmente sigue su plan de hacer lo que su teléfono le aconseja, habrá un mundo en el que una versión de usted pide pepperoni, y otro en el que una versión de usted pide salchicha. Lamentablemente, las dos personas no tienen forma de comunicarse entre sí para compartir notas de cata después.

Incluso para el físico cuántico más aguerrido, uno debe admitir que esto *suena ridículo*. Pero es la lectura más directa de nuestra mejor comprensión de la mecánica cuántica.

La pregunta surge naturalmente: ¿Qué debemos hacer al respecto? Si el mundo real es realmente tan radicalmente diferente del mundo de nuestra experiencia diaria, ¿tiene esto alguna implicación en cómo vivimos nuestras vidas?

En gran medida, no. Para cada individuo en alguna rama de la función de la onda, la vida continúa como si viviera en un solo mundo con eventos cuánticos verdaderamente estocásticos. Pero vale la pena explorar los temas.

Puede descargar sus decisiones difíciles a un generador de números aleatorios cuánticos, asegurándose así de que haya al menos una rama de la función de onda en la que se haya elegido la mejor alternativa. Pero digamos que elegimos no hacerlo. ¿Debería la ramificación de nuestros yos actuales en múltiples yos futuros afectar a las decisiones que tomamos? En la visión de los libros de texto, hay una probabilidad de que uno u otro resultado ocurra cuando observamos un sistema cuántico, mientras que en muchos mundos todos los resultados ocurren, ponderados por la amplitud al cuadrado de la función de onda. ¿La existencia de todos esos mundos adicionales tiene implicaciones en la forma en que debemos actuar, personalmente o éticamente?

No es difícil imaginar que podría, pero tras una cuidadosa consideración resulta que importa mucho menos de lo que se podría suponer. Considere el infame experimento del suicidio cuántico, o la idea relacionada de la inmortalidad cuántica. Es una idea que se ha considerado desde que muchos mundos aparecieron en escena, el propio Hugh Everett creía en una versión de la inmortalidad cuántica, pero ha sido popularizada por el físico Max Tegmark.

Esta es la configuración: imaginamos un dispositivo mortal que se activa por una medida cuántica, como enviar una consulta a la aplicación Universe Splitter. Imagina que la medida cuántica tiene un 50 por ciento de probabilidades de disparar un arma que dispara una bala a mi cabeza a corta

distancia, y un 50 por ciento de probabilidades de no hacer nada. De acuerdo con Muchos Mundos, eso implica la existencia de dos ramas de la función de onda, una de las cuales contiene una versión viva de mí, la otra contiene una versión muerta.

Supongamos que a efectos del experimento de pensamiento creemos que la vida misma es un fenómeno puramente físico, por lo que podemos dejar de lado las consideraciones sobre la vida después de la muerte. Desde mi perspectiva, la rama en la que el arma disparó no es una que ninguna versión de mí llegue a experimentar, mi descendiente en ese mundo está muerto. Pero mi descendiente continúa, ileso, en la rama donde el arma no disparó. En cierto sentido, entonces, "yo" viviré para siempre, incluso si repito este macabro procedimiento una y otra vez. Se podría llegar a argumentar que no debería objetar el hecho de realizar este experimento (dejando de lado el resto de los sentimientos del mundo hacia mí, supongo) - en las ramas donde el arma disparó "yo" no existe realmente, mientras que en la única rama donde no disparó una y otra vez estoy perfectamente sano. (El punto original de Tegmark era menos grandioso: simplemente señaló que un experimentador que sobrevivió a un gran número de pruebas tendría una buena razón para aceptar la imagen de Everett). Esta conclusión contrasta fuertemente con una formulación estocástica convencional de la mecánica cuántica, en la que sólo hay un mundo, y yo tendría una posibilidad cada vez más pequeña de estar vivo dentro de él.

No recomiendo que intente tal experimento en casa. De hecho, la lógica detrás de no preocuparse por las ramas en las que te matan es más que un poco torpe.

Considere la vida en una imagen anticuada, clásica, de un solo universo. Si pensaras que vives en un universo así, ¿te importaría que alguien se acercara sigilosamente por detrás y te disparara en la cabeza para que murieras al instante? (De nuevo, dejando de lado la posibilidad de que otras personas se molesten.) La mayoría de nosotros no estaríamos a favor de que eso ocurriera. Pero según la lógica anterior, no debería "importarte", después de todo, una vez que estás muerto, no hay ningún "tú" que se moleste por lo que pasó.

El punto que se pasa por alto en este análisis es que estamos molestos *ahora - mientras que* todavía estamos muy vivos y sintiendo - por la perspectiva de estar muertos en el futuro, especialmente si ese futuro llega más pronto que tarde. Y esa es una perspectiva válida; gran parte de cómo pensamos sobre nuestras vidas actuales depende de una proyección hacia el resto de nuestra existencia. Cortar esa existencia es algo a lo que se nos permite objetar perfectamente, incluso si no vamos a estar cerca para ser molestados por ello una vez que suceda. Y dado eso, el suicidio cuántico resulta ser tan sombrío y desagradable como nuestra intuición inmediata podría sugerir. Está bien que anhele una vida feliz y larga para todas las versiones futuras de mí que terminarán en varias ramas de la función de onda, tanto como sería válido para mí esperar una larga vida si pensara que sólo hay un mundo.

Esto se remonta a algo que discutimos en el capítulo siete: la importancia de tratar a los individuos de las diferentes ramas de la función de onda como personas distintas, aunque hayan descendido del mismo individuo en el pasado. Hay una importante asimetría entre cómo pensamos sobre "nuestro futuro" versus "nuestro pasado" en muchos mundos, que en última instancia puede atribuirse a la condición de baja entropía de nuestro universo temprano. Cualquier individuo puede rastrear sus vidas hacia atrás en una persona única, pero yendo hacia adelante en el tiempo nos ramificaremos en múltiples personas. No hay un solo yo futuro que sea elegido como "realmente tú", y es igualmente cierto que no hay una persona constituida por todos esos individuos futuros. Están separados, tanto como los gemelos idénticos son personas distintas, a pesar de descender de un solo cigoto.

Puede que nos preocupe lo que ocurre con las versiones de nosotros mismos que viven en otras ramas, pero no es sensato pensar en ellos como "nosotros". Imagina que estás a punto de realizar una medición de giro vertical en un electrón que has preparado en una superposición igual de spin-up y spin-down. Un filántropo al azar entra en tu laboratorio y te ofrece la siguiente ganga: si el spin está arriba, te dan un millón de dólares; si el spin está abajo, les das un dólar. Sería prudente aceptar el trato; a todos los efectos, es como si le ofrecieran una apuesta con iguales posibilidades de ganar un millón de dólares o perder sólo un dólar, incluso si uno de sus futuros yos se quedara sin un dólar.

Pero ahora imagina que fuiste un poco más rápido en tu experimento, y observaste un resultado de giro justo antes de que el filántropo irrumpiera. Resulta que ellos son muy agresivos, y explican que la versión de ti en la otra sucursal recibe un millón de dólares, pero ahora tienes que darles un dólar en esta sucursal.

No hay razón para que te alegres por esto (o para que renuncies al dólar), aunque la versión de ti en la otra rama podría alegrarse por ello. Tú no eres ellos, y ellos no son parte de ti. Después de la sucursal, sois dos personas diferentes. Ni vuestras experiencias ni vuestras recompensas deben ser consideradas como compartidas por varias copias de vosotros en diferentes ramas. No jueguen a la ruleta rusa cuántica, y no acepten perder gangas de filántropos agresivos.

Esa puede ser una política razonable cuando se trata de su propio bienestar, pero ¿qué pasa con el de los demás? ¿Cómo afecta el conocimiento de la existencia de otros mundos a nuestras nociones de comportamiento moral o ético?

La forma correcta de pensar sobre la moral es en sí misma un tema controvertido, incluso en las versiones de un solo mundo de la realidad, pero es instructivo considerar dos amplias categorías de teoría moral: *la deontología* y *el consecuencialismo*. Los deontólogos sostienen que el comportamiento moral es una cuestión de obedecer las reglas correctas; las acciones son inherentemente correctas o incorrectas, cualesquiera que sean sus consecuencias. Los consecuencialistas, no es sorprendente, tienen el punto de vista alternativo: debemos trabajar para maximizar las consecuencias beneficiosas de nuestras acciones. Los utilitaristas, que abogan por maximizar alguna medida de bienestar general, son paradigmáticos consecuencialistas. Hay otras opciones, pero éstas ilustran el punto básico.

La deontología parece no estar afectada por la posible presencia de otros mundos. Si el objetivo de su teoría es que las acciones son intrínsecamente correctas o incorrectas, independientemente de los resultados a los que conducen, la existencia de más mundos en los que esos resultados pueden ocurrir no importa realmente. Una típica regla deontológica es el imperativo categórico de Kant: "Actúa sólo de acuerdo con esa máxima por la que puedes, al mismo tiempo, querer que se convierta en una ley universal". Parece que aquí sería seguro sustituir "una ley universal" por "una ley que regule todas las ramas de la función de onda", sin alterar ningún juicio sustantivo sobre el tipo de acciones que podrían calificarse.

El consecuencialismo es otro asunto completamente distinto. Imagine que usted es un utilitario sin sentido, que cree que hay una cantidad llamada *utilidad* que mide la cantidad de bienestar asociada con las criaturas conscientes, y que esta cantidad puede ser sumada entre todas las criaturas para obtener una utilidad total, y que el curso de acción moralmente correcto es el que maximiza esta utilidad total. Imagina además que juzgas la utilidad total en todo el universo como un número positivo. (Si no lo hicieras, estarías a favor de intentar de alguna manera destruir el universo, lo que hace una buena historia de origen supervillano pero no para los buenos vecinos).

De ello se desprendería que, si el universo tiene una utilidad positiva y nuestro objetivo es maximizar la utilidad, crear una nueva copia de todo el universo sería una de las acciones más valiosas desde el punto de vista moral que se podrían llevar a cabo. Lo correcto sería entonces ramificar la función de onda del universo tan a menudo como sea posible. Podríamos imaginar la construcción de un dispositivo de maximización de utilidad cuántica (QUMaD), tal vez un aparato que haga rebotar continuamente los electrones a través de un dispositivo que mida primero su giro vertical y luego su giro horizontal. Cada vez que un electrón se somete a una de estas medidas, el universo se ramifica en dos, duplicando la utilidad total de todos los universos. Habiendo construido el QUMaD y haberlo encendido, sería la persona más moral que jamás haya vivido.

Sin embargo, algo de esto huele mal. Encender el QUMaD no tiene ningún impacto en la vida de la gente en este universo o en cualquier otro. Ni siquiera saben que la máquina existe. ¿Estamos realmente seguros de que tiene un efecto tan moralmente digno de alabanza?

Afortunadamente hay un par de maneras de salir de este rompecabezas. Una es negar las suposiciones: tal vez este tipo de utilitarismo sin sentido no es la mejor teoría moral. Hay una larga y honorable tradición de gente que inventa cosas que nominalmente aumentarían la utilidad del universo, pero no se parecen en nada a nuestras intuiciones morales. (Robert Nozick imaginó un "monstruo de utilidad", un ser hipotético que era tan bueno para experimentar placer que la cosa más moral que cualquiera podría hacer sería mantener al monstruo lo más feliz posible, sin importar quién más podría sufrir por ello). QUMaD es sólo otro ejemplo en esta línea. La simple idea de sumar utilidades entre diferentes personas no siempre conduce a los resultados que podríamos haber imaginado inicialmente.

Pero hay otra solución, una que se ajusta más directamente a la filosofía de Muchos Mundos. Cuando hablamos de derivar la regla de Born, discutimos cómo repartir las credenciales en condiciones de incertidumbre auto-localizada: conoces la función de onda del universo, pero no sabes en qué rama estás. La respuesta era que tus credenciales debían ser proporcionales al peso de la rama, la amplitud correspondiente, al cuadrado. Este "peso" es un aspecto crucial de cómo pensamos sobre los mundos en una imagen de Everet. No es sólo la probabilidad lo que va en esa dirección; la conservación de la energía también sólo funciona si multiplicamos la energía de cada rama por su peso asociado.

Tiene sentido, entonces, que hagamos lo mismo con la utilidad. Si tenemos un universo con alguna utilidad total dada, y medimos un espín para ramificarlo en dos, la utilidad posterior a la ramificación debería ser la suma de los pesos de cada rama por sus utilidades. Entonces, en el caso probable de que nuestra medición del espín no haya afectado la utilidad de nadie de manera sustancial, la utilidad total no se verá afectada por nuestra medición. Eso es justo lo que nuestra intuición podría esperar. También es lo que concluiríamos directamente del enfoque teórico de la decisión sobre la probabilidad que mencionamos en el Capítulo Seis. Desde esta perspectiva, Muchos Mundos no debería cambiar nuestras ideas sobre la acción moral de ninguna manera perceptible.

Sin embargo, es posible inventar un sistema en el que la diferencia entre muchos mundos y teorías de colapso sea moralmente relevante. Imaginemos que algún experimento cuántico nos llevará a resultados igualmente probables A o B, siendo A extremadamente bueno y B un poco bueno, y que estos efectos se aplican a todos en el mundo con igual medida. En una visión de un solo mundo, un utilitario (o cualquier persona con sentido común, en realidad) estaría a favor de llevar a cabo el experimento, ya que tanto el bien vasto de A como el bien menor de B aumentarían la utilidad neta del mundo. Pero imagina que tu código ético está enteramente dedicado a la igualdad: no te importa lo que suceda, siempre y cuando le suceda a todos por igual. En la teoría del colapso, no sabes qué resultado ocurrirá, pero cualquiera de los dos mantiene la igualdad, por lo que sigue siendo una buena idea llevar a cabo el experimento. Pero en Muchos Mundos, la gente de una rama experimentará A mientras que los de la otra rama experimentarán B. Incluso si las ramas no pueden comunicarse o interactuar de otra manera, esto podría ofender tu sensibilidad moral, así que estarías en contra de hacer el experimento en absoluto. Personalmente no creo que la desigualdad entre las personas que literalmente viven en mundos diferentes deba importarnos tanto, pero la posibilidad lógica está ahí.

Excluyendo tales construcciones artificiales, Muchos Mundos no parece tener muchas implicaciones morales. La imagen de la ramificación como la "creación" de una copia completamente nueva del universo es muy vívida, pero no es del todo correcta. Es mejor pensar en ello como la división del universo existente en rebanadas casi idénticas, cada una de las cuales tiene un peso menor que el original. Si seguimos esa imagen cuidadosamente, concluimos que es correcto pensar en nuestro futuro exactamente como si viviéramos en un único universo estocástico que obedeciera a la regla de Born. Por más contradictorio que parezca, al final del día no cambia realmente la forma en que debemos vivir nuestras vidas.

Hasta ahora hemos tratado la ramificación de la función de la onda como algo que ocurre independientemente de nosotros, de modo que simplemente tenemos que seguir el camino. Vale la pena preguntarse si esa es la perspectiva adecuada. Cada vez que tomo una decisión, ¿se crean mundos diferentes donde elegí cosas diferentes? ¿Hay realidades ahí fuera que se corresponden con cada serie de elecciones alternativas que podría haber hecho, universos que actualizan todas las posibilidades de mi vida?

La idea de "tomar una decisión" no es algo inscrito en las leyes fundamentales de la física. Es una de esas nociones útiles, aproximadas y emergentes que encontramos conveniente invocar cuando describimos fenómenos a escala humana. Lo que usted y yo llamamos "tomar una decisión" es un conjunto de procesos neuroquímicos que ocurren en nuestro cerebro. Está perfectamente bien hablar de tomar decisiones, pero no es algo que esté por encima de las cosas materiales ordinarias y que obedezca a las leyes de la física.

Así que la pregunta es, ¿los procesos físicos que ocurren en tu cerebro cuando tomas una decisión *hacen que* la función de onda del universo se ramifique, con diferentes decisiones que se toman en cada rama? Si estoy jugando al póquer y pierdo todas mis fichas después de hacer un engaño inoportuno, ¿puedo consolarme con la idea de que hay otra rama en la que jugué de forma más conservadora?

No, no haces que la función de onda se ramifique al tomar una decisión. En gran parte eso se debe a lo que queremos (o deberíamos) decir con algo que "causa" algo más. La ramificación es el resultado de un proceso microscópico amplificado a escalas macroscópicas: un sistema en una superposición cuántica se enreda con un sistema más grande, que luego se enreda con el entorno, lo que lleva a la decoherencia. Una decisión, por otra parte, es un fenómeno puramente macroscópico. Los electrones y los átomos dentro del cerebro no toman decisiones; sólo obedecen las leyes de la física.

Las decisiones y elecciones y sus consecuencias son conceptos útiles cuando hablamos de cosas a nivel macroscópico, de tamaño humano. Está perfectamente bien pensar que las elecciones existen realmente y tienen influencias, siempre y cuando confinemos tal conversación al régimen en el que se

aplican. Podemos elegir, en otras palabras, hablar de una persona como un montón de partículas que obedecen a la ecuación de Schrödinger, o podemos igualmente hablar de ellas como un agente con voluntad que toma decisiones que afectan al mundo. Pero no podemos usar ambas descripciones a la vez. Sus decisiones no causan que la función de onda se ramifique, porque "la ramificación de la función de onda" es un concepto relevante a nivel de la física fundamental, y "sus decisiones" es un concepto relevante a nivel macroscópico cotidiano de la gente.

Así que no tiene sentido que sus decisiones causen ramificaciones. Pero aún podemos preguntarnos si hay otras ramas en las que tomaste decisiones diferentes. Y de hecho podría haberlas, pero la forma correcta de pensar sobre la causalidad es "ocurrió algún proceso microscópico que causó la ramificación, y en diferentes ramas terminaste tomando diferentes decisiones", en lugar de "tomaste una decisión, que causó que la función de onda del universo se ramificara". Sin embargo, en su mayor parte, cuando tomas una decisión -incluso una que parece muy cercana en ese momento- casi todo el peso se concentrará en una sola rama, no repartida por igual entre muchas alternativas.

Las neuronas en nuestro cerebro son células que consisten en un cuerpo central y un número de apéndices. La mayoría de esos apéndices son dendritas, que reciben las señales de las neuronas circundantes, pero una de ellas es el axón, una fibra más larga por la que se envían las señales de salida. Las moléculas cargadas (iones) se acumulan en la neurona hasta que alcanzan un punto en el que se dispara un pulso electroquímico, viajando por el axón y a través de las sinapsis hasta las dendritas de otras neuronas. Combinando muchos de estos eventos, tenemos los elementos de un "pensamiento". (Estamos pasando por alto algunas complicaciones aquí; esperemos que los neurocientíficos me perdonen.)

En su mayor parte, estos procesos pueden ser considerados como puramente clásicos, o al menos deterministas. La mecánica cuántica juega un papel en algún nivel de cualquier reacción química, ya que es la mecánica cuántica la que establece las reglas de cómo los electrones quieren saltar de un átomo a otro o unir dos átomos. Pero cuando se juntan suficientes átomos en un lugar, su comportamiento neto puede describirse sin ninguna referencia a conceptos cuánticos como el enredo o la regla de Born; de lo contrario, no habrías podido tomar una clase de química en la escuela secundaria sin aprender primero la ecuación de Schrödinger y preocuparte por el problema de la medición.

Así que las "decisiones" son mejor pensadas como eventos clásicos, no como eventos cuánticos. Mientras que usted puede estar personalmente inseguro de la elección que eventualmente hará, el resultado está codificado en su cerebro. No estamos absolutamente seguros de hasta qué punto esto es cierto, ya que todavía hay mucho que no sabemos sobre los procesos físicos detrás del pensamiento. Es posible que las tasas de reacciones químicas neurológicas importantes puedan variar ligeramente dependiendo del enredo entre los diferentes átomos involucrados. Si eso resulta ser cierto, habría un sentido en el que tu cerebro es un ordenador cuántico, aunque limitado.

Al mismo tiempo, un honesto Everettiano admite que siempre habrá ramas de la función de onda en las que los sistemas cuánticos parecen haber hecho cosas muy improbables. Como Alice mencionó en el capítulo ocho, habrá ramas en las que me topo con una pared y hago un túnel a través de ella, en lugar de rebotar. Del mismo modo, incluso si la aproximación clásica a mi cerebro implica que voy a apostar todas mis fichas en la mesa de póquer, hay una pequeña amplitud para que un montón de neuronas hagan cosas improbables y me hagan hacer un pliegue ajustado. Pero no es mi decisión la que está causando la ramificación; es la ramificación la que interpreto que conduce a mi decisión.

Bajo el entendimiento más directo de la química que ocurre en nuestros cerebros, la mayor parte de nuestro pensamiento no tiene nada que ver con el enredo y la ramificación de la función de la onda. No deberíamos imaginar que tomar una decisión difícil divide el mundo en múltiples copias, cada una de ellas conteniendo una versión de ti que eligió de manera diferente. A menos, por supuesto, que no quieras asumir la responsabilidad, y convertir tu decisión en un generador de números aleatorios cuánticos.

Del mismo modo, la mecánica cuántica no tiene nada que ver con la cuestión del libre albedrío. Es natural pensar que podría, ya que el libre albedrío se contrasta a menudo con el determinismo, la idea de que el futuro está completamente determinado por el estado actual del universo. Después de todo, si el futuro está determinado, ¿qué espacio hay para que yo pueda elegir? En la presentación de los libros de texto de la mecánica cuántica, los resultados de las mediciones son verdaderamente aleatorios, por lo que la física no es determinista. ¿Quizás eso abre la puerta a una grieta para que el

libre albedrío se cuele de nuevo, después de haber sido desterrado por el paradigma newtoniano de la mecánica clásica?

Hay tanto mal en esto que es difícil saber por dónde empezar. En primer lugar, "libre albedrío" versus "determinismo" no es la distinción correcta que hay que hacer. El determinismo debería oponerse al "indeterminismo", y el libre albedrío debería oponerse al "no libre albedrío". El determinismo es fácil de definir: dado el estado actual exacto del sistema, las leyes de la física determinan con precisión el estado en momentos posteriores. El libre albedrío es más complicado. Normalmente se oye definir el libre albedrío como algo como "la capacidad de haber elegido de otra manera". Esto significa que estamos comparando lo que realmente ocurrió (estábamos en una situación, tomamos una decisión, y actuamos en consecuencia) con un escenario hipotético diferente (retrocedemos el reloj a la situación original, y nos preguntamos si "podríamos haber" decidido de forma diferente). Cuando se juega a este juego, es crucial especificar exactamente lo que se mantiene fijo entre las situaciones reales e hipotéticas. ¿Es absolutamente todo, hasta el último detalle microscópico? ¿O simplemente imaginamos que fijamos nuestra información macroscópica disponible, permitiendo la variación dentro de los detalles microscópicos invisibles?

Digamos que somos duros en esta cuestión, y comparemos lo que realmente ocurrió con un hipotético relanzamiento del universo a partir de exactamente la misma condición inicial, hasta el estado preciso de cada una de las últimas partículas elementales. En un universo determinista clásico el resultado sería exactamente el mismo, así que no hay posibilidad de que pudieras "tomar una decisión diferente". Por el contrario, según la mecánica cuántica de libro, se introduce un elemento de aleatoriedad, por lo que no podemos predecir con confianza exactamente el mismo resultado futuro a partir de las mismas condiciones iniciales.

Pero eso no tiene nada que ver con el libre albedrío. Un resultado diferente no significa que hayamos manifestado algún tipo de influencia volitiva personal y suprafísica sobre las leyes de la naturaleza. Sólo significa que algunos números aleatorios cuánticos impredecibles surgieron de manera diferente. Lo que importa para la noción tradicional "fuerte" del libre albedrío no es si estamos sujetos a leyes deterministas de la naturaleza, sino si estamos sujetos a leyes impersonales de cualquier tipo. El hecho de que no podamos predecir el futuro no es lo mismo que la idea de que somos libres de llevarlo a cabo. Incluso en los libros de texto de mecánica cuántica, los seres humanos siguen siendo colecciones de partículas y campos que obedecen a las leyes de la física.

En este sentido, la mecánica cuántica no es necesariamente indeterminada. Muchos Mundos es un contraejemplo. Se evoluciona, perfectamente determinista, de una sola persona ahora a múltiples personas en un tiempo futuro. No hay opciones en la materia en ningún lugar.

Por otra parte, también podemos contemplar una noción más débil de libre albedrío, que se refiere al conocimiento macroscópico disponible que realmente tenemos sobre el mundo, en lugar de realizar experimentos de pensamiento basados en un conocimiento microscópicamente perfecto. En ese caso, surge una forma diferente de imprevisibilidad. Dada una persona y lo que nosotros (o ellos, o cualquiera) sabemos sobre su estado mental actual, típicamente habrá muchos diferentes arreglos específicos de átomos y moléculas en sus cuerpos y cerebros que son compatibles con ese conocimiento. Algunas de esas disposiciones pueden conducir a procesos neuronales lo suficientemente diferentes como para que terminemos actuando de forma muy distinta, si esas disposiciones hubieran sido verdaderas. En ese caso, lo mejor que podemos hacer para describir de forma realista la forma en que los seres humanos (u otros agentes conscientes) actúan en el mundo real es atribuirles la voluntad, es decir, la capacidad de elegir de forma diferente.

Atribuir la voluntad a la gente es lo que cada uno de nosotros hace en realidad a medida que vamos por la vida hablando de nosotros mismos y de los demás. A efectos prácticos no importa si podemos predecir el futuro desde el conocimiento perfecto del presente, porque no tenemos tal conocimiento, ni lo tendremos nunca. Esto ha llevado a los filósofos, que se remontan a Thomas Hobbes, a proponer la *compatibilidad* entre las leyes deterministas subyacentes y la realidad de la toma de decisiones humanas. La mayoría de los filósofos modernos son compatibilistas sobre el libre albedrío (lo que no significa que sea correcto, por supuesto). El libre albedrío es real, al igual que las tablas y la temperatura y las ramas de la función de onda.

En lo que respecta a la mecánica cuántica, no importa si eres un compatibilista o un incompatibilista en lo que respecta al libre albedrío. En ninguno de los dos casos la incertidumbre cuántica debería afectar a tu postura; incluso si no puedes predecir el resultado de una medición cuántica, ese resultado se deriva de las leyes de la física, no de ninguna elección personal hecha por ti. No creamos el mundo por nuestras acciones, nuestras acciones son parte del mundo.

Sería negligente hablar sobre el lado humano de muchos mundos sin enfrentar la cuestión de la conciencia. Hay una larga historia de afirmación de que la conciencia humana es necesaria para entender la mecánica cuántica, o que la mecánica cuántica puede ser necesaria para entender la conciencia. Mucho de esto puede atribuirse a la impresión de que la mecánica cuántica es misteriosa, y la conciencia es misteriosa, así que tal vez tengan algo que ver entre sí.

Eso no está mal, en lo que a eso se refiere. Tal vez la mecánica cuántica y la conciencia están de alguna manera interconectadas; es una hipótesis que podemos contemplar. Pero de acuerdo con todo lo que sabemos actualmente, no hay ninguna buena evidencia de que este sea realmente el caso.

Examinemos primero si la mecánica cuántica podría ayudarnos a entender la conciencia. Es concebible -aunque está lejos de ser cierto- que los ritmos de varios procesos neuronales en el cerebro dependen del entrelazamiento cuántico de una manera interesante, de modo que no pueden ser comprendidos por el razonamiento clásico solamente. Pero tener en cuenta la conciencia, como tradicionalmente pensamos en ello, no es una cuestión directa de las tasas de los procesos neuronales. Los filósofos distinguen entre el "problema fácil" de la consciencia - averiguar cómo percibimos las cosas, reaccionamos ante ellas, pensamos en ellas - y el "problema difícil" - nuestra experiencia subjetiva, en primera persona, del mundo; lo que es ser nosotros, en lugar de otra persona.

La mecánica cuántica no parece tener nada que ver con el problema difícil. La gente lo ha intentado: Roger Penrose, por ejemplo, se ha asociado con el anestesiólogo Stuart Hameroff para desarrollar una teoría en la que el colapso objetivo de las funciones de onda de los microtúbulos en el cerebro ayuda a explicar por qué experimentamos la conciencia. Esta propuesta no ha tenido mucha aceptación en la comunidad de la neurociencia. Y lo que es más importante, no está claro por qué debería importar en absoluto para la conciencia. Es perfectamente concebible que algunos procesos cuánticos sutiles en el cerebro, que involucran microtúbulos o algo completamente diferente, afecten la velocidad a la que nuestras neuronas disparan. Pero esto no ayuda en absoluto a cerrar la brecha entre "el disparo de nuestras neuronas" y "nuestra experiencia subjetiva y autoconsciente". Muchos científicos y filósofos, incluido yo mismo, no tienen problemas para creer que esta brecha es muy salvable. Pero un pequeño cambio en el ritmo de este o aquel proceso neuroquímico no parece ser relevante para entender cómo. (Y si lo fuera, no hay razón para que el efecto no pueda repetirse en ordenadores no humanos).

La mecánica cuántica de Everet no tiene nada específico que decir sobre el difícil problema de la conciencia que no sería compartido por ningún otro punto de vista en el que el mundo sea completamente físico. En tal punto de vista, los hechos relevantes sobre la conciencia incluyen estos:

1. La conciencia surge del cerebro.
2. Los cerebros son sistemas físicos coherentes.

Eso es todo. ("Coherente" aquí significa "hecho de partes que interactúan mutuamente"; dos colecciones de neuronas en dos ramas no interactivas de la función de onda son dos cerebros distintos). Puedes extender "cerebros" a "sistemas nerviosos" u "organismos" o "sistemas de procesamiento de información" si quieres. El punto es que no estamos haciendo suposiciones adicionales sobre la conciencia o la identidad personal para discutir la mecánica cuántica de muchos mundos; es una teoría quintaesencialmente mecanicista, sin un papel especial para los observadores o las experiencias. Los observadores conscientes se ramifican junto con el resto de la función de la onda, por supuesto, pero también lo hacen las rocas y los ríos y las nubes. El reto de comprender la conciencia es tan difícil, ni más ni menos, en muchos mundos como lo habría sido sin la mecánica cuántica en absoluto.

Hay muchos aspectos importantes de la conciencia que los científicos no entienden actualmente. Eso es precisamente lo que deberíamos esperar; la mente humana en general, y la conciencia en particular, son fenómenos extremadamente complejos. El hecho de que no los entendamos completamente no debería tentarnos a proponer leyes completamente nuevas de la física fundamental para ayudarnos. Las leyes de la física se entienden enormemente mejor, y esa comprensión ha sido mucho mejor verificada por medio de experimentos, que el funcionamiento de nuestros cerebros y su relación con nuestras mentes. Puede que algún día tengamos que contemplar la posibilidad de modificar las leyes de la física para dar cuenta con éxito de la conciencia, pero eso debería ser un último recurso.

También podemos darle la vuelta a la pregunta: Si la mecánica cuántica no ayuda a explicar la conciencia, ¿es posible que la conciencia juegue un papel central en la explicación de la mecánica cuántica?

Muchas cosas son posibles. Pero hay un poco más que eso. Dada la prominencia que se le da al acto de medición en las reglas de la teoría cuántica estándar de los libros de texto, es natural preguntarse si no hay algo especial en la interacción entre una mente consciente y un sistema cuántico. ¿Podría el colapso de la función de onda ser causado por la percepción consciente de ciertos aspectos de los objetos físicos?

Según el punto de vista de los libros de texto, las funciones de onda se colapsan cuando se miden, pero lo que precisamente constituye "medición" se deja un poco vago. La interpretación de Copenhague plantea una distinción entre los reinos cuántico y clásico, y trata la medición como una interacción entre un observador clásico y un sistema cuántico. Dónde debemos trazar la línea es difícil de especificar. Si tenemos un contador Geiger observando la emisión de una fuente radiactiva, por ejemplo, sería natural tratar el contador como parte del mundo clásico. Pero no tenemos que hacerlo; incluso en Copenhague, podríamos imaginarnos tratando los contadores Geiger como sistemas cuánticos que obedecen a la ecuación de Schrödinger. Sólo cuando el resultado de una medición es percibido por un ser humano que (en esta forma de pensar) la función de onda tiene que colapsar absolutamente, porque ningún ser humano ha informado nunca de estar en una superposición de diferentes resultados de medición. Así que el último lugar posible donde podemos dibujar el corte es entre "observadores que pueden testificar si están en una superposición" y "todo lo demás". Dado que la percepción de no estar en una superposición es parte de nuestra conciencia, no es una locura preguntar si es realmente la conciencia la que causa el colapso.

Esta idea fue propuesta ya en 1939, por Fritz London y Edmond Bauer, y más tarde ganó el favor de Eugene Wigner, quien ganó el Premio Nobel por su trabajo en las simetrías. En palabras de Wigner:

> Todo lo que la mecánica cuántica pretende proporcionar son conexiones de probabilidad entre impresiones posteriores (también llamadas "apercepciones") de la conciencia, y aunque la línea divisoria entre el observador, cuya conciencia está siendo afectada, y el objeto físico observado puede ser desplazada hacia uno u otro en un grado considerable, no puede ser eliminada. Puede ser prematuro creer que la filosofía actual de la mecánica cuántica seguirá siendo un rasgo permanente de las futuras teorías físicas; seguirá siendo notable, cualquiera que sea la forma en que se desarrollen nuestros futuros conceptos, que el propio estudio del mundo exterior haya llevado a la conclusión de que el contenido de la conciencia es una realidad última.

El propio Wigner cambió más tarde de opinión sobre el papel de la conciencia en la teoría cuántica, pero otros han tomado la antorcha. Generalmente no es una opinión de la que se oirá hablar con aprobación en las conferencias de física, pero hay algunos científicos que continúan tomándoselo en serio.

Si la conciencia jugara un papel en el proceso de medición cuántica, ¿qué significaría exactamente? El enfoque más directo sería plantear una teoría *dualista* de la conciencia, según la cual la "mente" y la "materia" son dos categorías distintas que interactúan. La idea general sería que nuestros cuerpos físicos están hechos de partículas con una función de onda que obedece a la ecuación de Schrödinger, pero que la conciencia reside en una mente inmaterial separada, cuya influencia hace que las funciones de onda se colapsen al ser percibidas. El dualismo ha disminuido en popularidad desde su apogeo en la época de René Descartes. El enigma básico es el "problema de interacción": ¿Cómo interactúan la mente y la materia entre sí? En el contexto actual, ¿cómo se supone que una mente inmaterial, carente de extensión en el espacio y el tiempo, va a provocar el colapso de las funciones de onda?

Hay otra estrategia, sin embargo, que parece a la vez menos torpe y considerablemente más dramática. Es el *idealismo*, en el sentido filosófico de la palabra. No significa "perseguir ideales elevados", sino que la esencia fundamental de la realidad es de carácter mental, más que físico. El idealismo puede contrastarse con el fisicalismo o el materialismo, que sugieren que la realidad está fundamentalmente hecha de cosas físicas, y las mentes y la conciencia surgen de eso como fenómenos colectivos. Si el fisicalismo afirma que sólo existe el mundo físico, y el dualismo afirma que existen tanto el reino físico como el mental, el idealismo afirma que sólo existe el reino mental. (No hay mucho apoyo en el terreno para la posibilidad lógica restante, que no existe ni lo físico ni lo mental).

Para un idealista, la mente es lo primero, y lo que pensamos como "materia" es un reflejo de nuestros pensamientos sobre el mundo. En algunas versiones de la historia, la realidad emerge del esfuerzo colectivo de todas las mentes individuales, mientras que en otras, un único concepto de "lo mental" subyace tanto a las mentes individuales como a la realidad que éstas traen consigo. Algunas de las mayores mentes filosóficas de la historia, incluidas muchas de las diversas tradiciones

orientales, pero también occidentales como Immanuel Kant, han simpatizado con alguna versión de idealismo.

No es difícil ver cómo la mecánica cuántica y el idealismo pueden parecer un buen ajuste. El idealismo dice que la mente es el fundamento último de la realidad, y la mecánica cuántica (en su formulación de libro de texto) dice que propiedades como la posición y el impulso no existen hasta que son observadas, presumiblemente por alguien con mente.

Todas las variedades de idealismo son desafiadas por el hecho de que, aparte de la polémica excepción de la medición cuántica, el mundo real parece moverse bastante bien sin ninguna ayuda particular de las mentes conscientes. Nuestras mentes descubren cosas sobre el mundo a través del proceso de observación y experimentación, y diferentes mentes terminan descubriendo aspectos del mundo que siempre terminan siendo totalmente coherentes entre sí. Hemos reunido un relato bastante detallado y exitoso de los primeros minutos de la historia del universo, una época en la que no había mentes conocidas que pensaran en ello. Mientras tanto, el progreso en la neurociencia ha sido cada vez más capaz de identificar procesos de pensamiento particulares con eventos bioquímicos específicos que tienen lugar en el material que compone nuestros cerebros. Si no fuera por la mecánica cuántica y el problema de la medición, toda nuestra experiencia de la realidad hablaría de la sabiduría de poner la materia en primer lugar y la mente emergente de ella, en lugar de lo contrario.

Entonces, ¿es la rareza del proceso de medición cuántica lo suficientemente intratable como para que debamos descartar el fisicalismo en sí mismo, en favor de una filosofía idealista que toma la mente como el terreno primario de la realidad? ¿La mecánica cuántica implica necesariamente la centralidad de lo mental?

No. No *necesitamos invocar* ningún papel especial para la conciencia para abordar el problema de la medición cuántica. Hemos visto varios contraejemplos. Muchos Mundos es un ejemplo explícito, que explica el aparente colapso de la función de onda usando el proceso puramente mecánico de decoherencia y ramificación. Se nos permite contemplar la posibilidad de que la consciencia esté de alguna manera involucrada, pero es igual de cierto que no nos obliga nada de lo que entendemos actualmente. Por supuesto, a menudo hablaremos de experiencias conscientes en nuestros intentos de mapear el formalismo cuántico en el mundo tal y como lo vemos, pero sólo cuando las cosas que estamos tratando de explicar son esas mismas experiencias. De lo contrario, las mentes no tienen nada que ver con ello.

Estos son temas difíciles y sutiles, y este no es el lugar para una adjudicación completamente justa y exhaustiva del debate entre el idealismo y el fisicalismo. El idealismo no es algo fácil de refutar; si alguien está convencido de que es correcto, es difícil señalar cualquier cosa que obviamente cambiaría su mente (o su espíritu). Pero lo que no pueden hacer es afirmar que la mecánica cuántica nos obliga a tal posición. Tenemos modelos muy sencillos y convincentes del mundo en el que la realidad existe independientemente de nosotros; no hay necesidad de pensar que traemos la realidad a la existencia observándola o pensando en ella.

PART THREE

SPACETIME

11

¿Por qué hay espacio?

Emergencia y Localidad

Bien, por fin estamos listos para pensar en el mundo real.

Un momento, te oigo pensar. *Pensé que ya estábamos hablando del mundo real. ¿No se supone que la mecánica cuántica describe el mundo real?*

Bueno, claro. Pero la mecánica cuántica también puede describir muchos otros mundos además del nuestro. La mecánica cuántica en sí misma no es una teoría única, en el sentido de ser un modelo de un sistema físico específico. Es un marco, como lo es la mecánica clásica, en el que podemos hablar de muchos sistemas físicos diferentes. Podemos hablar de la teoría cuántica de una sola partícula, o del campo electromagnético, o de un conjunto de giros, o de todo el universo. Ahora es el momento de centrarnos en cómo podría ser la teoría cuántica de nuestro mundo actual.

Este objetivo, encontrar la teoría cuántica correcta del mundo real, ha sido perseguido por generaciones de físicos desde principios del siglo XX. Por cualquier medida posible, han sido extraordinariamente exitosos. Una idea importante fue pensar en los elementos básicos de la naturaleza no como partículas sino como campos que impregnan el espacio, lo que llevó a la teoría cuántica de *campos*.

En el siglo XIX, los físicos parecían estar centrados en una visión del mundo en la que tanto las partículas como los campos jugaban un papel: la materia estaba hecha de partículas, y las fuerzas por las que interactuaban eran descritas por los campos. Hoy en día sabemos más; incluso las partículas que conocemos y amamos son en realidad vibraciones en campos que cubren el espacio que nos rodea. Cuando vemos huellas parecidas a partículas en un experimento de física, eso es un reflejo del hecho de que lo que vemos no es lo que realmente hay. En las circunstancias correctas vemos partículas, pero nuestras mejores teorías actuales dicen que los campos son más fundamentales.

La gravedad es la única parte de la física que no encaja cómodamente en el paradigma de la teoría del campo cuántico. A menudo oirás que "no tenemos una teoría cuántica de la gravedad", pero eso es un poco demasiado fuerte. Tenemos una teoría clásica de la gravedad extremadamente buena: La relatividad general de Einstein, que describe la curvatura del espacio tiempo. La relatividad general es en sí misma una teoría del campo, describe un campo que impregna todo el espacio, en este caso el campo gravitatorio. Y hemos comprendido muy bien los procedimientos para tomar una teoría de campo clásica y cuantificarla, dando como resultado una teoría de campo cuántica. Aplicando esos procedimientos a los campos conocidos de la física fundamental, terminamos con algo llamado la *Teoría del Núcleo*. La Teoría del Núcleo describe con precisión no sólo la física de partículas sino también la gravedad, siempre que la fuerza del campo gravitatorio no sea demasiado grande. Es suficiente para describir cada fenómeno que ocurre en su experiencia diaria, y bastante más allá de mesas y sillas, amebas y gatitos, planetas y estrellas.

El problema es que la Teoría del Núcleo no cubre un número de situaciones más allá de lo cotidiano, incluyendo lugares donde la gravedad se vuelve extrema, como los agujeros negros y el Big Bang. En otras palabras, tenemos una teoría de la gravedad cuántica que es adecuada cuando la gravedad es bastante débil, una que es perfectamente capaz de describir por qué las manzanas caen de los árboles o cómo la luna orbita la Tierra. Pero es limitada; una vez que la gravedad se vuelve muy fuerte, o intentamos llevar nuestros cálculos demasiado lejos, nuestro aparato teórico nos falla. Por lo que podemos decir, esta situación es exclusiva de la gravedad. Para todas las demás partículas y fuerzas, las teorías de campo cuántico parecen ser capaces de manejar cualquier situación que podamos imaginar.

Ante la dificultad de cuantificar la relatividad general como lo haríamos con cualquier otra teoría de campo, hay una serie de estrategias que podríamos probar. Una de ellas es simplemente pensarlo más detenidamente; tal vez haya una buena manera de cuantificar directamente la relatividad general, pero implica nuevas técnicas que no hemos necesitado para otras teorías de campo. Un enfoque diferente es imaginar que la relatividad general no es la teoría correcta para cuantificar; tal vez deberíamos empezar con un precursor clásico distinto, como la teoría de cuerdas, y luego cuantificar eso, esperando construir una teoría cuántica que incluya la gravedad junto con todo lo demás. Los físicos han estado probando ambos enfoques desde hace algunas décadas, con algunos éxitos pero aún quedan muchos enigmas sin resolver.

Aquí vamos a considerar una estrategia diferente, una que se enfrenta a la naturaleza cuántica de la realidad desde el principio. Todo físico entiende que el mundo es fundamentalmente cuántico, pero como en realidad hacemos física no podemos evitar ser influenciados por nuestra experiencia e intuiciones, que han sido entrenadas durante mucho tiempo en los principios clásicos. Hay partículas, hay campos, hacen cosas, podemos observarlos. Incluso cuando nos movemos explícitamente a la mecánica cuántica, los físicos generalmente comienzan por tomar una teoría clásica y cuantificarla. Pero la naturaleza no hace eso. La naturaleza simplemente *es cuántica* desde el principio; la física clásica, como insistió Everett, es una aproximación que es útil en las circunstancias adecuadas.

Aquí es donde alcanzamos la recompensa por todo nuestro duro trabajo en los capítulos anteriores. Muchos Mundos está especialmente indicado para la tarea de desechar toda nuestra intuición clásica, ser cuántico desde el principio, y determinar cómo el mundo aproximadamente clásico que vemos a nuestro alrededor emerge en última instancia de la función de onda del universo, el espacio-tiempo y todo.

En las alternativas a Muchos Mundos, a menudo se necesitan variables adicionales (como en la mecánica de Bohmian) o reglas sobre cómo las funciones de las ondas se colapsan espontáneamente (como en GRW). Estas se derivan típicamente de nuestra experiencia con el límite clásico de la teoría en cuestión, y es exactamente esa experiencia la que nos ha fallado hasta ahora para la gravedad cuántica. Muchos Mundos, por el contrario, no dependen de ninguna superestructura adicional. En última instancia no es una teoría de tipos particulares de "cosas", sólo estados cuánticos que evolucionan bajo la ecuación de Schrödinger. Eso nos crea trabajo extra en circunstancias ordinarias, ya que tenemos que explicar por qué vemos un mundo de partículas y campos. Pero en este contexto único de gravedad cuántica, es una ventaja, ya que tenemos que hacer ese trabajo de todos modos. Muchos Mundos, con su perspectiva cuántica, es el enfoque correcto si sientes que no conocemos ninguna teoría clásica que pueda servir como el punto de partida correcto para construir una teoría cuántica de la gravedad.

Antes de cavar en la gravedad cuántica propiamente dicha, necesitamos sentar algunas bases. La relatividad general es una teoría de la dinámica del espacio-tiempo, así que en este capítulo nos preguntaremos por qué el concepto de "espacio" es tan importante en primer lugar. La respuesta reside en el concepto de *localidad: las cosas interactúan entre sí* cuando están cerca en el espacio. En el próximo capítulo veremos cómo los campos cuánticos que se propagan por el espacio encarnan este principio de localidad, y nos enseñan algo sobre la naturaleza del espacio vacío. En el capítulo siguiente investigaremos cómo extraer el espacio mismo de la función de onda cuántica. Y en el capítulo final veremos que cuando la gravedad se hace fuerte, la localidad misma tendrá que ser abandonada como principio central. El misterio de la gravedad cuántica parece estar íntimamente conectado con las virtudes y los defectos de la idea de localidad.

Vale la pena tener cuidado con la "localidad", ya que se utiliza en dos sentidos algo diferentes: lo que podríamos llamar localidad de *medición* y *localidad dinámica*. El experimento de pensamiento EPR muestra que hay algo que parece no local en la medición cuántica. Alicia mide su giro, y lo que Bob medirá por su giro a lo lejos se ve inmediatamente afectado, incluso si no lo sabe. El teorema de Bell implica que cualquier teoría en la que las mediciones tengan resultados definidos, básicamente, cada enfoque de la mecánica cuántica que no sea el de Muchos Mundos, va a presentar este tipo de medición no local. El que Muchos Mundos sea no local en este sentido depende de cómo elegimos definir nuestras ramas de la función de onda; se nos permite hacer elecciones locales o no locales, donde la ramificación ocurre sólo cerca o inmediatamente en todo el espacio.

La localidad dinámica, por otro lado, se refiere a la evolución suave del estado cuántico cuando no hay ninguna medición o ramificación. Ese es el contexto en el que los físicos esperan que todo sea perfectamente local, con perturbaciones en un lugar que sólo afectan inmediatamente a las cosas cercanas. Este tipo de localidad se rige por la regla de la relatividad especial de que nada puede viajar más rápido que la luz. Y es esta localidad dinámica la que nos preocupa en este momento mientras estudiamos la naturaleza y el surgimiento del propio espacio.

Con esto en mente, podemos arremangarnos un poco y profundizar en la cuestión de cómo la estructura de nuestra realidad observada -vivimos en un mundo que parece una colección de objetos localizados en el espacio, comportándose aproximadamente de forma clásica excepto por ocasionales saltos cuánticos- surge de la función de las ondas cuánticas. La mecánica cuántica de los Evertes pretende contar una historia sobre muchos de esos mundos, pero los postulados de la teoría

(funciones de onda, evolución suave) ni siquiera mencionan los "mundos" en absoluto. ¿De dónde vienen los mundos, y por qué los mundos parecen aproximadamente clásicos?

En nuestra discusión sobre la decoherencia, señalamos que se puede pensar que un sistema cuántico se ha dividido en múltiples copias separadas una vez que se enreda con el entorno más grande que lo rodea, ya que lo que le ocurra a cada copia no podrá interferir con lo que le ocurra a las otras. Sin embargo, si queremos ser rigurosos, eso nos dice que se nos *permite pensar que* la función de onda decoherida describe mundos separados, no que *debemos pensar en ello de esa* manera, y mucho menos que *necesitamos pensar en ello de esa manera*. ¿Podemos hacerlo mejor?

La verdad es que nada nos obliga a pensar que la función de la onda describe múltiples mundos, incluso después de la decoherencia. Podríamos hablar de la función de onda como un todo. Es muy útil dividirla en mundos.

Muchos Mundos describe el universo usando un solo objeto matemático, la función de onda. Hay muchas formas de *hablar de* la función de onda que nos dan una visión física de lo que está pasando. Puede ser útil en algunos casos hablar en términos de posición, por ejemplo, y en otros casos en términos de impulso. Asimismo, a menudo es útil hablar de la función de onda de post-decoherencia como la descripción de un conjunto de mundos distintos; eso se justifica, porque lo que ocurre en cada rama no afecta a lo que ocurre en las demás. Pero en última instancia, ese lenguaje es una conveniencia para nosotros, no algo en lo que la propia teoría insista. Fundamentalmente, la teoría sólo se preocupa por la función de onda como un todo.

A modo de analogía, piensa en todo el asunto en la habitación que te rodea ahora mismo. Podrías describirla, ayudándonos con la aproximación clásica por el momento, listando la posición y la velocidad de cada átomo en la habitación. Pero eso sería una locura. No tienes acceso a toda esa información, ni podrías usarla si lo hicieras, ni la necesitas realmente. En su lugar, se fragmenta lo que te rodea en un conjunto de conceptos útiles: sillas, mesas, luces, pisos, etc. Esa es una descripción mucho más compacta que la de un listado de cada átomo, pero aún así nos da una gran cantidad de información sobre lo que está pasando.

Del mismo modo, caracterizar el estado cuántico en términos de múltiples mundos no es necesario, sólo nos da un manejo enormemente útil en una situación increíblemente compleja. Como Alice insistió en el capítulo ocho, los mundos no son fundamentales. Más bien, son *emergentes*.

El surgimiento en este sentido no se refiere a los eventos que se desarrollan a lo largo del tiempo, como cuando un pajarito emerge de su huevo. Es una forma de describir el mundo que no es completamente exhaustiva, pero que divide la realidad en trozos más manejables. Nociones como habitaciones y pisos no se encuentran en las leyes fundamentales de la física, son emergentes. Son formas de describir eficazmente lo que está pasando incluso si carecemos de un conocimiento perfecto de todos y cada uno de los átomos y moléculas que nos rodean. Decir que algo es emergente es decir que es parte de una descripción aproximada de la realidad que es válida a un cierto nivel (generalmente macroscópico), y debe ser contrastado con cosas "fundamentales", que son parte de una descripción exacta a nivel microscópico.

En el experimento de pensamiento demoníaco de Laplace, imaginamos una vasta inteligencia que conocería todas las leyes de la física y el estado exacto del mundo, además de tener una capacidad de cálculo ilimitada. Para el demonio, todo lo que es, fue y será es completamente conocido. Pero ninguno de nosotros es el demonio de Laplace. En realidad, tenemos en el mejor de los casos información parcial sobre el estado del mundo, y una capacidad de cálculo bastante limitada. Ninguno de nosotros mira una taza de café y ve cada partícula en cada átomo; vemos algunos rasgos macroscópicos gruesos del líquido y de la taza. Pero esa puede ser toda la información que necesitamos para tener una discusión útil sobre el café, y para predecir su comportamiento en una variedad de circunstancias. Una taza de café es un fenómeno emergente.

Lo mismo puede decirse de los mundos en la mecánica cuántica de Everet. Para una versión cuántica del demonio de Laplace, con un conocimiento exacto del estado cuántico del universo, nunca habría necesidad de dividir la función de onda en un conjunto de ramas que describieran una colección de mundos. Pero es enormemente conveniente y útil hacerlo, y se nos permite aprovechar esta conveniencia porque los mundos individuales no interactúan entre sí.

Eso no significa que los mundos no sean "reales". Fundamental versus emergente es una distinción, y real versus no real es una completamente separada. Las sillas, mesas y tazas de café son indudablemente reales, ya que describen los verdaderos patrones del universo, los que organizan el mundo de manera que reflejan la realidad subyacente. Lo mismo ocurre con los mundos de Everet. Elegimos invocarlos cuando tallamos la función de onda para nuestra conveniencia, pero no hacemos ese tallado al azar. Hay maneras correctas e incorrectas de dividir la función de onda en ramas, y las maneras correctas nos dejan mundos independientes que obedecen aproximadamente a las leyes

clásicas de la física. Las formas en que realmente funcionan están determinadas en última instancia por las leyes fundamentales de la naturaleza, no por el capricho humano.

La emergencia no es una característica genérica de los sistemas físicos. Ocurre cuando hay una forma especial de describir el sistema que involucra mucha menos información de lo que una descripción completa lo haría, pero que sin embargo nos da una idea útil de lo que está pasando. Por eso tiene sentido que esculpamos la realidad de la forma en que lo hacemos, describiendo mesas y sillas y ramas de la función de onda.

Piensa en un planeta que orbita alrededor del sol. Un planeta como la Tierra contiene aproximadamente 1050 partículas. Para describir el estado de la Tierra con exactitud, incluso en el nivel clásico, sería necesario enumerar la posición y el momento de cada una de esas partículas, algo que está más allá incluso de nuestra más salvaje imaginación de potencia de supercomputación. Afortunadamente, si lo que nos importa es sólo la órbita del planeta, la gran mayoría de esa información es completamente innecesaria. En cambio, podemos idealizar la Tierra como un único punto, situado en el centro de masa de la Tierra y con el mismo impulso total. El estado de este punto idealizado está especificado por una posición y un momento, y esa pequeñísima cantidad de información (seis números, tres cada uno para la posición y el momento, en lugar de 6×1050 números, posiciones y momentos para cada partícula) es todo lo que necesitamos para calcular su trayectoria. Eso es la emergencia: una forma de capturar características importantes de un sistema usando mucha menos información de la que supondría una descripción exhaustiva. *

A menudo hablamos de las descripciones emergentes en términos de cuán "convenientes" son para que las usemos, pero no se dejen engañar para pensar que hay algo antropocéntrico. Las mesas y sillas y los planetas seguirían existiendo aunque no hubiera seres humanos para hablar de ellos. "Conveniencia" es una abreviatura para indicar una propiedad física objetiva: la existencia de un modelo preciso del sistema que requiere sólo una pequeña fracción de la información completa que lo caracteriza.

La emergencia no es automática. Es algo especial y precioso, y proporciona una enorme simplificación cuando ocurre. Imagina que conocemos la posición de cada una de las 1050 partículas de la Tierra, pero no conocemos el momento de ninguna de ellas. Poseemos una enorme cantidad de información, la mitad de la información total disponible, pero tenemos precisamente cero capacidad para predecir hacia dónde se dirigirá la Tierra. Estrictamente hablando, incluso si conocemos el momento de todas las partículas de la Tierra excepto una, pero no tenemos ningún conocimiento de un momento exacto, no podemos decir qué hará la Tierra a continuación; es posible que esta única partícula tenga tanto momento como todas las demás combinadas.

Esa es la situación genérica de la física. Para predecir con precisión lo que un sistema hecho de muchas partes hará a continuación, es necesario hacer un seguimiento de la información de todas las partes. Pierdes un poco, y no sabes nada. El surgimiento ocurre cuando lo contrario es posible: podemos tirar casi toda la información, manteniendo sólo un poco (siempre y cuando identifiques correctamente qué bit), y aún así decir bastante sobre lo que sucederá.

En el caso del centro de masa de un objeto hecho de muchas partículas, el tipo de información en la descripción emergente que tenemos es exactamente el mismo que el tipo con el que empezamos (posición y momento), sólo que mucho menos. Pero la emergencia puede ser más sutil que eso; la descripción emergente puede ser de una cosa completamente diferente a la que empezamos.

Considere el aire de nuestra habitación. Imagina que dividimos el espacio en pequeñas cajas, tal vez un milímetro a cada lado. Cada caja todavía contiene un gran número de moléculas. Pero en lugar de llevar un registro del estado de cada una de ellas, llevamos un registro de las cantidades medias como la densidad, la presión y la temperatura en cada caja. Resulta que esta es toda la información que necesitamos para hacer predicciones precisas de cómo se comportará el aire. La teoría emergente describe un tipo diferente de cosa, un fluido en lugar de un conjunto de moléculas, pero esa descripción del fluido es suficiente para describir el aire con un alto grado de precisión. Tratar el aire como un fluido requiere mucho menos datos que tratarlo como una colección de partículas; la descripción del fluido es emergente.

Los mundos de Everet son iguales. No necesitamos llevar un registro de toda la función de la onda para hacer predicciones útiles, sólo lo que sucede en un mundo individual. Para una buena aproximación podemos tratar lo que sucede en cada mundo usando la mecánica clásica, con sólo la ocasional intervención cuántica cuando nos enredamos con sistemas microscópicos en superposición. Por eso las leyes de Newton de la gravitación y el movimiento son suficientes para volar cohetes a la

luna sin conocer el estado cuántico completo del universo; nuestra rama individual de la función de onda describe un mundo emergente casi clásico.

Las ramas de la función de onda, que describen mundos separados, no se mencionan en los postulados de muchos mundos. Tampoco se mencionan las mesas y sillas y el aire en la Teoría del Núcleo de partículas y fuerzas. Como el filósofo Daniel Dennett ha dicho, en términos que fueron portados a contexto cuántico por David Wallace, cada mundo es un rasgo emergente que captura "patrones reales" dentro de la dinámica subyacente. Un patrón real nos da una forma precisa de hablar del mundo, sin apelar a una descripción microscópica exhaustiva. Eso es lo que hace que los patrones emergentes en general, y los mundos de Everet en particular, sean indiscutiblemente reales.

Una vez que se cree que las ramas de la función de onda pueden ser pensadas útilmente como mundos emergentes, se podría empezar a preguntar por qué es este conjunto de mundos en particular. ¿Por qué terminamos viendo objetos macroscópicos con ubicaciones bastante bien definidas en el espacio, en lugar de estar en superposiciones de diferentes ubicaciones? ¿Por qué el "espacio" es aparentemente un concepto tan central en absoluto? Los libros de texto de introducción a la mecánica cuántica a veces dan la impresión de que el comportamiento clásico es inevitable una vez que los objetos se vuelven muy grandes, pero eso es una tontería. No tenemos ningún problema en imaginar una función de onda que describa objetos macroscópicos en todo tipo de extrañas superposiciones. La respuesta real es más interesante.

Podemos empezar a entender la naturaleza especial del espacio comparando cómo pensamos sobre la posición con cómo pensamos sobre el impulso. Cuando Isaac Newton escribió por primera vez las ecuaciones de la mecánica clásica, la posición jugó claramente un papel privilegiado, mientras que la velocidad y el momento eran cantidades derivadas. La posición es "dónde estás en el espacio", mientras que la velocidad es "cuán rápido te mueves por el espacio", y el momento es masa por velocidad. El espacio parece ser lo principal.

Pero una mirada más profunda revela que los conceptos de posición e impulso están más en igualdad de condiciones de lo que parecen. Tal vez no deberíamos sorprendernos; después de todo, la posición y el impulso son las dos cantidades que juntas definen el estado de un sistema clásico. De hecho, en la formulación hamiltoniana de la mecánica clásica, la posición y el momento están explícitamente en pie de igualdad. ¿Es esto un reflejo de alguna simetría subyacente que no es obvia en la superficie?

En nuestra vida cotidiana, la posición y el impulso parecen bastante diferentes. Lo que un matemático llamaría "el espacio de todas las posiciones posibles" es lo que el resto de nosotros llamamos "espacio"; es el mundo tridimensional en el que vivimos. El "espacio de todos los posibles momentos", o "espacio del momento", también es tridimensional, pero es un concepto aparentemente abstracto. Nadie cree que vivamos allí. ¿Por qué no?

La característica que hace especial al espacio es la localidad. Las interacciones entre los diferentes objetos ocurren cuando están cerca en el espacio. Dos bolas de billar rebotan una sobre la otra cuando se juntan en la misma posición espacial. Nada de esto ocurre cuando las partículas tienen el mismo (u opuesto) momento; si no están en el mismo lugar, simplemente siguen su alegre camino. Esa no es una característica necesaria de las leyes de la física, podríamos imaginar otros mundos posibles donde no fuera el caso, pero es una que parece sostenerse bastante bien en nuestro mundo.

Las bolas de billar que rebotan son clásicas, pero la misma discusión se podría hacer sobre la mecánica cuántica. El formalismo cuántico básico también trata por igual la posición y el impulso. Podemos expresar la función de onda adjuntando una amplitud compleja a cada posible lugar en el que la partícula pueda estar, o podríamos expresarla igual de bien adjuntando un número complejo a cada posible momento que la partícula pueda tener. Las dos formas de describir el mismo estado cuántico subyacente son equivalentes, expresando la misma información de diferentes maneras, como vimos al discutir el principio de incertidumbre.

Esto es algo profundo. Hemos dicho que una función de onda de impulso definido parece una onda sinusoidal. Pero eso es lo que parece en términos de posición, que es el lenguaje que naturalmente tendemos a hablar. Expresado en términos de momento, el mismo estado cuántico se vería como un pico situado en ese momento particular. Un estado con posición definida se vería como una onda sinusoidal extendida en todos los momentos posibles. Esto comienza a sugerir que lo que realmente importa es la noción abstracta de "el estado cuántico", y no su realización específica como una función de onda en términos de posición o de momento.

La simetría se rompe, una vez más, por el hecho de que en nuestro mundo particular, las interacciones ocurren cuando los sistemas están cerca en el espacio. Esta es una localidad dinámica en funcionamiento. Desde una perspectiva de Muchos Mundos que trata los estados cuánticos como fundamentales y todo lo demás como emergentes, esto sugiere que realmente deberíamos dar vuelta las cosas: las "posiciones en el espacio" son las variables en las que las interacciones parecen locales. El espacio no es fundamental; es sólo una forma de organizar lo que ocurre en la función de onda cuántica subyacente.

Este punto de vista nos ayuda a entender por qué la función de la onda Everettiana puede dividirse naturalmente en un conjunto de mundos aproximadamente clásicos. Esta cuestión se conoce como el *problema de la base preferida*. Muchos Mundos se basa en el hecho de que la función de onda del universo generalmente describirá todo tipo de superposiciones, incluyendo estados en los que los objetos macroscópicos están en superposiciones de estar en lugares muy diferentes. Pero nunca vemos sillas o bolas de bolos o planetas en superposiciones; en lo que respecta a nuestra experiencia, siempre parecen tener ubicaciones definidas, y su movimiento obedece a las reglas de la mecánica clásica hasta una muy buena aproximación. ¿Por qué los estados que vemos nunca involucran superposiciones macroscópicas? Podemos escribir la función de onda como una combinación de muchos mundos distintos, pero ¿por qué dividirla en *estos mundos* en particular?

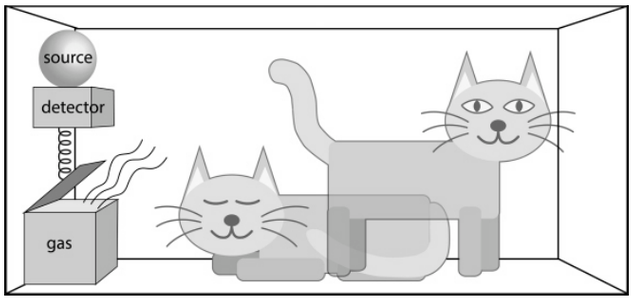
La respuesta se descubrió esencialmente en los años 80, usando la decoherencia, aunque los investigadores todavía están trabajando en los detalles. Para llegar allí, es útil recurrir a ese viejo recurso de pensamiento-experimento, el Gato de Schrödinger. Tenemos una caja sellada que contiene un gato y un contenedor de gas para dormir. El escenario original de Schrödinger involucraba veneno, pero no hay razón para imaginarnos matando al gato. (Su hija Ruth pensó una vez: "Creo que a mi padre no le gustaban los gatos").

Nuestro experimentador ha preparado un muelle para abrir el contenedor, liberando el gas y poniendo al gato a dormir, pero sólo cuando un detector como un contador Geiger hace clic al detectar una partícula de radiación. Junto al detector hay una fuente radioactiva. Conocemos la velocidad a la que se emiten las partículas de la fuente, así que podemos calcular la probabilidad de que el contador haga clic y libere el martillo después de un período de tiempo determinado.

La emisión radioactiva es un proceso fundamentalmente cuántico. Lo que informalmente describimos como la emisión ocasional y aleatoria de una partícula es en realidad una evolución suave de la función de onda de los núcleos atómicos dentro de la fuente. Cada núcleo evoluciona desde un estado de puro no descompuesto a una superposición de (no descompuesto)+(descompuesto), con esta última parte creciendo gradualmente con el tiempo. La emisión parece aleatoria porque el detector no mide directamente la función de onda; sólo ve o bien (sin decaer) o bien (decaído), al igual que un imán vertical de Stern-Gerlach sólo ve siempre spin-up o spin-down.

El punto del experimento de pensamiento es tomar una superposición cuántica microscópica y ampliarla a una situación manifiestamente macroscópica. Eso sucede tan pronto como el detector hace clic. Todo el asunto con el gas somnífero y el gato es sólo para hacer más vívida la amplificación de una superposición cuántica al mundo macroscópico. (La palabra "enredo", o en alemán *Verschränkung*, fue aplicada por primera vez a la mecánica cuántica por Schrödinger en la discusión de su gato, que surgió de la correspondencia con Einstein).

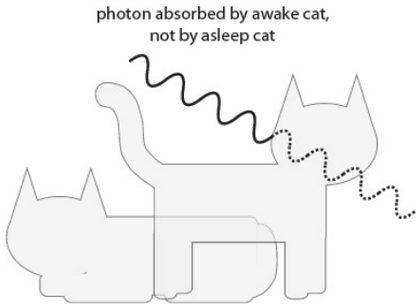
El experimento de Schrödinger se planteó en el contexto del enfoque de libro de texto del problema de la medición, en el que las funciones de onda se colapsan cuando se observan literalmente. Así que, dice, imagina que mantenemos la caja cerrada, sin observar lo que hay dentro, hasta que la función de onda evolucione a una superposición uniforme de "al menos un núcleo ha decaído" y "ningún núcleo ha decaído". En ese caso, las funciones de onda del detector, el gas y el gato también evolucionarán a una superposición igual, de "el detector hizo clic, el gas se liberó, y el gato está dormido" y "el detector aún no hizo clic, el gas aún está en el recipiente, y el gato está despierto". Seguramente, pregunta Schrödinger, ¿no creerás en serio que la caja contiene una superposición de un gato despierto y otro dormido hasta que la abramos?



En lo que respecta a eso, tenía razón. Una vez que tenemos una perspectiva de la dinámica cuántica de Everet, aceptamos que la función de onda evoluciona suavemente en una superposición igual de dos posibilidades, una en la que el gato está dormido y la otra en la que está despierto. Pero la decoherencia nos dice que el gato también está enredado con su entorno, que consiste en todas las moléculas de aire y fotones dentro de la caja. La ramificación efectiva en mundos separados ocurre casi inmediatamente después de que el detector hace clic. Para cuando el experimentador se acerca a la apertura de la caja, hay dos ramas de la función de onda, cada una de las cuales tiene un solo gato y un solo experimentador, no una superposición.

Esto resuelve la preocupación original de Schrödinger, pero plantea otra. ¿Por qué cuando abrimos la caja, los estados cuánticos decoheridos que vemos son los de un gato despierto o un gato dormido? ¿Por qué no vemos una superposición de ambos? "Despierto" y "Dormido" juntos representan sólo una posible base para el sistema del gato, al igual que "spin-up" y "spin-down" lo hacen para el electrón. ¿Por qué se prefiere esa base a cualquier otra?

El proceso físico que importa es la materia en el medio ambiente -moléculas de gas, fotones- que interactúan con el sistema físico en cuestión. El que una partícula en particular interactúe realmente con el gato dependerá de dónde esté el gato. Un fotón dado puede ser absorbido por un gato que está despierto y merodeando alrededor de la caja, pero que no se encuentra con un gato que está durmiendo en el suelo.



Lo especial de la base "Despierto"/"Dormido", en otras palabras, es que los estados individuales describen configuraciones bien definidas en el espacio. Y el espacio es la cantidad con respecto a la cual las interacciones físicas son locales. Una partícula puede chocar con un gato si la partícula y el gato entran en contacto físico. Las dos partes de la función de la onda del gato, "Despierto" y "Dormido", entran en contacto con diferentes partículas del entorno, y por lo tanto se ramifican en mundos diferentes.

Los estados base preferidos son aquellos que describen objetos coherentes en el espacio, porque tales objetos interactúan consistentemente con sus entornos. A menudo se denominan *estados de puntero*, ya que son los estados en los que el puntero de un dispositivo de medición macroscópico indicará un valor definido, en lugar de estar en una superposición. La base del puntero es donde tiene sentido una aproximación clásica bien hecha, y por lo tanto es ese tipo de base la que define los mundos emergentes. La decoherencia es el fenómeno que en última instancia vincula la austera simplicidad de la mecánica cuántica de Everet a la desordenada particularidad del mundo que vemos.

---

* Lamentablemente, hay definiciones contrapuestas de la palabra "emergencia", algunas de las cuales significan casi lo contrario del sentido utilizado aquí. Nuestra definición se denomina a veces "emergencia débil" en la literatura, en contraposición a "emergencia fuerte", en la que el todo es irreducible a la suma de sus partes.

12

Un mundo de vibraciones

Teoría del Campo Cuántico

La frase "acción a distancia", normalmente modificada por el adjetivo "espeluznante" de Einstein, se invoca a menudo en los debates sobre el entrelazamiento cuántico y el rompecabezas EPR. Pero la idea es mucho más antigua que eso, se remonta al menos a Isaac Newton y su teoría de la gravedad.

Si Newton no hubiera hecho nada más que armar la estructura básica de la mecánica clásica, sería un candidato principal para el más grande físico de todos los tiempos. Lo que confirma su afirmación de la corona es que hizo mucho más que eso, incluyendo pequeñas cosas como inventar el cálculo. Aún así, cuando la mayoría de la gente ve una foto de Newton con su magnífica peluca, piensan en su teoría de la gravedad.

La gravedad newtoniana puede resumirse en la famosa ley del cuadrado inverso: la fuerza gravitatoria entre dos objetos es proporcional a la masa de cada uno de ellos, e inversamente proporcional al cuadrado de la distancia entre ellos. Así que si movieras la Luna para que estuviera el doble de lejos de la Tierra, la fuerza gravitatoria entre ellos sería sólo un cuarto de grande. Usando esta simple regla, Newton fue capaz de mostrar que los planetas se moverían naturalmente en elipses alrededor del sol, confirmando la relación empírica que había sido postulada por Johannes Kepler años antes.

Pero Newton nunca estuvo realmente satisfecho con su propia teoría, precisamente porque presentaba acción a distancia. La fuerza entre dos objetos depende de dónde se encuentra cada uno de ellos, y cuando un objeto se mueve, la dirección de su atracción gravitacional cambia instantáneamente en todo el universo. No había nada en medio que pudiera mediar tal cambio; simplemente ocurrió. Esto molestó a Newton, no porque fuera ilógico o incompatible con la observación, sino porque parecía equivocado. Espeluznante, se podría decir.

> Es inconcebible que la materia bruta inanimada, sin la mediación de otra cosa que no es material, opere y afecte a otra materia sin contacto mutuo. . . . La gravedad debe ser causada por un agente que actúa constantemente de acuerdo con ciertas leyes; pero ya sea este agente material o inmaterial, he dejado a la consideración de mis lectores.

Hay de hecho un "agente" que hace que la gravedad actúe de la manera en que lo hace, y ese agente es perfectamente material, es el campo gravitacional. Este concepto fue introducido por primera vez por Pierre-Simon Laplace, quien fue capaz de reescribir la teoría de la gravedad de Newton para que la fuerza fuera transportada por un campo potencial gravitatorio, en lugar de simplemente saltar misteriosamente a través de distancias infinitas. Pero un cambio en la fuerza aún ocurrió instantáneamente a través de todo el espacio. No fue hasta que Einstein llegó con la relatividad general que se demostró que los cambios en el campo gravitatorio, al igual que los cambios en el campo electromagnético, viajaban por el espacio a la velocidad de la luz. La relatividad general sustituye el potencial de Laplace por el campo "métrico", una forma matemáticamente sofisticada de caracterizar la curvatura del espacio tiempo, pero la idea general de un campo gravitatorio que impregna todo el espacio ha permanecido intacta.

La idea de un campo portador de una fuerza es conceptualmente atractiva porque instancia la idea de localidad. A medida que la Tierra se mueve, la dirección de su atracción gravitatoria no cambia instantáneamente en todo el universo. Más bien, cambia justo donde está la Tierra, y entonces el campo en ese punto tira del campo cercano, que tira del campo un poco más lejos, y así sucesivamente en una onda que se mueve hacia afuera a la velocidad de la luz.

La física moderna extiende esta idea a literalmente todo en el universo. La Teoría del Núcleo se construye comenzando con un conjunto de campos y luego cuantificándolos. Incluso las partículas como los electrones y los quarks son realmente vibraciones en los campos cuánticos. Es una historia maravillosa en sí misma, pero nuestro objetivo en este capítulo es un poco más modesto: entender el "vacío" en la teoría de campos cuánticos, el estado cuántico correspondiente al espacio vacío. (He relegado al Apéndice una breve discusión de los estados con partículas reales en ellos). Más adelante abordaremos la emergencia cuántica del propio espacio, pero por ahora seremos tristemente

convencionales y pensaremos en la teoría de campos cuánticos como lo que se obtiene cuando se cuantifica una teoría de campos clásica en un espacio preexistente.

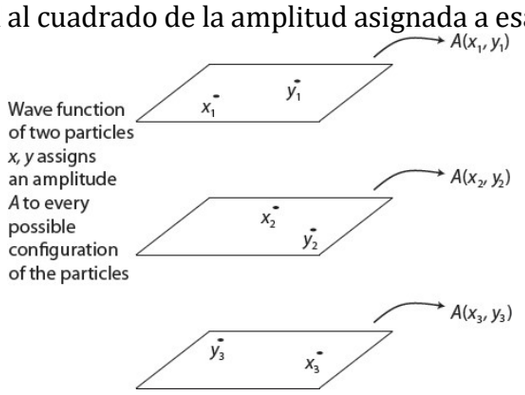
Una de las lecciones que aprenderemos es que el entrelazamiento juega un papel aún más central en la teoría de campos cuánticos que en las teorías de partículas cuánticas. Cuando las partículas eran nuestra principal preocupación, el entrelazamiento era algo que podía o no ser importante, dependiendo de las circunstancias físicas. Puedes crear un estado de dos electrones enredados, pero hay muchos estados interesantes de dos electrones en los que las partículas no están en absoluto enredadas. En la teoría del campo, por el contrario, esencialmente cada estado físicamente interesante es uno que presenta una enorme cantidad de entrelazamiento. Incluso el espacio vacío, que se podría pensar que es bastante sencillo, se describe en la teoría cuántica de campos como una intrincada colección de vibraciones enredadas.

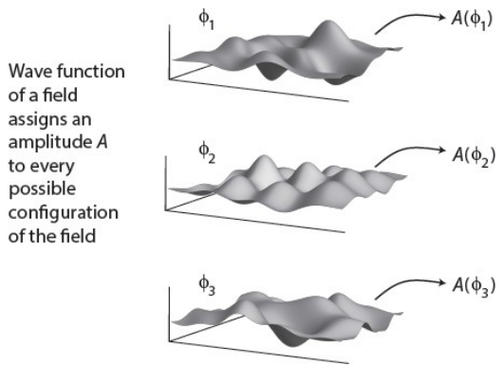
La mecánica cuántica comenzó cuando Planck y Einstein argumentaron que las ondas electromagnéticas tenían propiedades similares a las de las partículas, y luego Bohr, de Broglie y Schrödinger sugirieron que las partículas podían tener aspectos similares a las ondas. Pero hay dos tipos diferentes de "ondulación" trabajando aquí, y vale la pena ser cuidadoso para distinguir entre ellos. Un tipo de ondulación surge cuando hacemos la transición de una teoría clásica de partículas a una versión cuántica, obteniendo la función de onda cuántica de un conjunto de partículas. El otro tipo es cuando tenemos una teoría de campo clásica para empezar, incluso antes de que la mecánica cuántica se involucre en absoluto. Ese es el caso del electromagnetismo clásico, o de la teoría de la gravedad de Einstein. El electromagnetismo clásico y la relatividad general son ambas teorías de campos (y por lo tanto de ondas), pero son en sí mismas perfectamente clásicas.

En la teoría cuántica de campos, comenzamos con una teoría clásica de campos y construimos una versión cuántica de *la misma*. En lugar de una función de onda que nos dice la probabilidad de ver una partícula en algún lugar, tenemos una función de onda que nos dice la probabilidad de ver una configuración particular de un campo a través del espacio. Una función de onda de una onda, si se quiere.

Hay muchas maneras de cuantificar una teoría clásica, pero la más directa es la ruta que ya hemos tomado. Pensando en una colección de partículas, podemos preguntarnos: "¿Dónde pueden estar las partículas?" La respuesta para cada partícula individual es simplemente "En cualquier punto del espacio". Si hubiera una sola partícula, la función de onda asignaría por lo tanto una amplitud a cada punto del espacio. Pero cuando tenemos varias partículas, no hay una función de onda separada para cada partícula. Hay una gran función de onda, asignando una amplitud diferente a cada posible conjunto de lugares en los que todas las partículas podrían estar a la vez. Así es como puede ocurrir el enredo; para cada configuración de las partículas, hay una amplitud que podríamos cuadrar para obtener la probabilidad de observarlas allí todas al mismo tiempo.

Es lo mismo para los campos, con la "posible configuración de las partículas" reemplazada por "posibles configuraciones del campo", donde por "configuración" nos referimos ahora a los valores del campo en cada punto a lo largo de todo el espacio. Esta función de onda considera todas las configuraciones posibles del campo, y asigna una amplitud a cada una. Si pudiéramos imaginarnos observando el campo en todos los puntos a la vez, la probabilidad de obtener cualquier forma particular del campo será igual al cuadrado de la amplitud asignada a esa configuración.





Esta es la diferencia entre un campo clásico y una función de onda cuántica. Un campo clásico es una función del espacio, y una teoría clásica con muchos campos describiría múltiples funciones del espacio que se superponen entre sí. La función de onda en la teoría de campos cuánticos no es una función del espacio, es una función del conjunto de todas las configuraciones de todos los campos clásicos. (En la teoría del núcleo, eso incluiría el campo gravitatorio, el campo electromagnético, los campos para las diversas partículas subatómicas, etc.) Una bestia intimidante, pero algo que los físicos han aprendido a entender e incluso a apreciar.

Todo esto supone implícitamente la versión de la mecánica cuántica de muchos mundos. No dijimos nada sobre la decoherencia y la ramificación, pero hemos estado dando por sentado que todo lo que realmente necesitamos es una función de onda cuántica y una versión apropiada de la ecuación de Schrödinger, y el resto se encargará de sí mismo. Esa es exactamente la situación de Everet. (A veces cuando la gente dice "la ecuación de Schrödinger" se refiere específicamente a la versión que Schrödinger escribió originalmente, que sólo es apropiada para partículas puntuales no relativistas, pero no hay dificultad en encontrar una versión de la ecuación para campos cuánticos relativistas o cualquier otro sistema con un Hamiltoniano). En otras teorías, a menudo se necesitan variables o reglas adicionales sobre cómo las funciones de onda se colapsan espontáneamente. Cuando pasamos a la teoría de campos, no está inmediatamente claro cuáles deben ser esos ingredientes adicionales.

Si la teoría cuántica de campos describe el mundo como una función de onda de una configuración de campo clásica, eso parece ser una ondulación encima de la ondulación. Si preguntáramos cuánta ondulación podrían tener las cosas, la respuesta (parafraseando a Nigel Tufnel de Spinal Tap) podría ser "ninguna más ondulada". Y sin embargo, cuando hacemos observaciones de los campos cuánticos, por ejemplo, en un detector del Gran Colisionador de Hadrones en Ginebra, lo que vemos son huellas individuales que representan las trayectorias de objetos puntuales, no nubes onduladas difusas. De alguna manera hemos dado vueltas hasta llegar a las partículas, a pesar de ser tan onduladas como se puede.

La razón de esto se remonta a la misma razón por la que vemos niveles de energía discretos para los electrones en los átomos. Un electrón que se mueve por el espacio por sí solo puede tener cualquier energía, pero en las proximidades de la fuerza de atracción ejercida por un núcleo atómico, es como si el electrón estuviera atrapado en una caja. La función de onda cae a cero lejos del átomo; podemos pensar que está atado, como si fuera una cuerda atada en ambos extremos y libre para moverse entre ellos. En tales circunstancias, la cuerda atada sólo puede realizar un conjunto discreto de vibraciones; del mismo modo, la función de onda del electrón tiene un conjunto discreto de niveles de energía. Cada vez que la función de onda de un sistema se "ata" yendo a cero para configuraciones grandes/lejanas/extremas, exhibirá un conjunto de niveles de energía discretos.

Volviendo a la teoría de campo, considere una configuración de campo muy simple, una onda sinusoidal que se extiende por todo el espacio. Llamamos a tal configuración un *modo* de campo; es una forma conveniente de pensar, ya que cualquier configuración de campo en absoluto puede ser pensada como una combinación de muchos modos de diferentes longitudes de onda. Esa onda sinusoidal contiene energía, y la energía aumenta rápidamente a medida que imaginamos ondas de mayor y mayor altura. Queremos construir la función de onda cuántica *de* ese campo. Debido a que la energía del campo aumenta con la altura de la onda, la función de onda necesita disminuir rápidamente a medida que la altura de la onda aumenta, para no dar demasiada probabilidad a las ondas de muy alta energía. A todos los efectos, la función de onda está ligada (va a cero) a las grandes energías.

Como resultado, al igual que una cuerda vibrante o un electrón en un átomo, hay un conjunto discreto de niveles de energía para las vibraciones de un campo cuántico. De hecho, cada modo del campo puede estar en su estado de energía más bajo, o en el siguiente más alto, o en el siguiente más alto, y así sucesivamente. La función general de la onda de energía mínima es aquella en la que cada modo tiene la energía más baja posible. Ese es un estado único, que llamamos el *vacío*. Cuando los teóricos del campo cuántico hablan del vacío, no se refieren a una máquina que levanta el polvo del suelo, o incluso a una región del espacio interplanetario desprovista de materia. Lo que quieren decir es "el estado de menor energía de su teoría de campos cuánticos".

Se podría pensar que el vacío cuántico estaría vacío y aburrido, pero en realidad es un lugar salvaje. Un electrón en un átomo tiene el estado de energía más bajo en el que puede estar, pero si pensamos en ello como una función de onda de la posición del electrón, esa función todavía puede tener una forma interesante. Del mismo modo, el estado de vacío en la teoría del campo puede tener una estructura interesante si preguntamos sobre las partes individuales del campo.

El siguiente nivel de energía tiene algo más en marcha, ya que lo hacemos con las energías más altas de cada modo. Eso nos da un poco de libertad; puede haber estados que son en su mayoría modos de longitud de onda corta, o estados que son en su mayoría modos de longitud de onda larga, o cualquier mezcla. Lo que tienen en común es que cada modo está en su "primer estado excitado", con sólo un poco más de energía que el mínimo.

Poniendo todo esto junto, la función de onda para el primer estado excitado de una teoría de campo cuántico se ve exactamente como la de una sola partícula, expresada como una función de momento más que de posición. Generalmente habrá contribuciones de diferentes longitudes de onda, que interpretamos como diferentes momentos en la función de onda de la partícula. Lo más importante es que este tipo de estado se comporta de manera similar a una partícula cuando lo observamos: si medimos un poco de energía en un lugar (interpretado como "Acabo de ver una partícula allí"), es abrumadoramente probable que observemos la misma cantidad de energía cerca si miramos un momento después, incluso si la función de onda estaba originalmente toda extendida. Lo que acabas viendo es una vibración localizada que se propaga en el campo, dejando una huella en un detector experimental como se supone que debe hacer una partícula. Si se ve como una partícula y hace cuac como una partícula, tiene sentido llamarlo partícula.

¿Podemos tener una función de onda de teoría de campo cuántico que combine algunos modos en sus estados de menor energía y otros en sus primeros estados de excitación? Claro, eso sería una superposición de un estado de cero partículas y un estado de una partícula, dando un estado sin un número definido de partículas.

Como puedes estar preparado para adivinar, las funciones de la onda de energía más alta de una teoría de campos cuánticos se parecen a la función de onda de dos partículas. La historia continúa para los estados de campo cuántico que representan tres partículas, o cuatro, o lo que sea. Al igual que observamos que el gato de Schrödinger está o bien despierto o bien dormido, y no cualquier superposición de los mismos, las colecciones de partículas son lo que observamos cuando hacemos mediciones de los campos cuánticos que vibran suavemente. En el lenguaje del capítulo anterior, mientras los campos no fluctúen demasiado, los "estados punteros" de la teoría de campos cuánticos parecen colecciones de números definidos de partículas. Esos son los tipos de estados que vemos cuando miramos el mundo.

Aún mejor, la teoría de campos cuánticos puede describir transiciones entre estados con diferentes números de partículas, de la misma manera que un electrón puede subir o bajar de energía en un átomo. En la mecánica cuántica ordinaria basada en partículas, el número de partículas es fijo, pero la teoría de campo cuántico no tiene problemas para describir las partículas que decaen o se aniquilan o se crean en colisiones. Lo cual es bueno, porque cosas como esa suceden todo el tiempo.

La teoría cuántica de campos representa uno de los grandes triunfos de la unificación en la historia de la física, uniendo las ideas aparentemente opuestas de las partículas y las ondas. Una vez que nos damos cuenta de que la cuantificación del campo electromagnético conduce a fotones como partículas, quizás no debería sorprender que otras partículas como los electrones y quarks también surjan de campos cuantificados. Los electrones son vibraciones en el campo de electrones, varios tipos de quarks son vibraciones en varios tipos de campos de quarks, y así sucesivamente.

Las introducciones a la mecánica cuántica a veces contrastan las partículas y las ondas como si fueran dos caras iguales de la misma moneda, pero en última instancia la batalla entre las partículas y los campos no es una lucha justa. Los campos son más fundamentales; son los campos los que proporcionan la mejor imagen que tenemos actualmente de lo que está hecho el universo. Las partículas son simplemente lo que vemos cuando los campos en las circunstancias adecuadas. A veces las circunstancias no son las correctas; dentro de un protón o un neutrón, aunque a menudo hablamos de quarks y gluones como si fueran partículas individuales, es más exacto pensar en ellos como

campos difusos. Como el físico Paul Davies tituló una vez un artículo, con sólo un poco de exageración retórica, "Las partículas no existen".

Nuestro interés aquí está en el paradigma básico de la realidad cuántica, no en el patrón específico de las partículas y sus masas e interacciones. Nos interesa el entrelazamiento y la emergencia y cómo el mundo clásico surge de la función de la onda ramificada. Felizmente, para estos propósitos podemos concentrar nuestra atención en la teoría de campo cuántico del vacío, la física del espacio vacío, sin ninguna partícula volando alrededor.

Para traer a casa el interés del vacío de la teoría de campo, enfoquémonos en uno de sus aspectos más obvios, su energía. Es tentador pensar que la energía es cero por definición. Pero hemos tenido cuidado de no decir eso: el vacío es el "estado de menor energía", no necesariamente un "estado de energía cero". De hecho, su energía puede ser cualquier cosa; es una constante de la naturaleza, un parámetro del universo que no está determinado por ningún otro conjunto de parámetros medibles. En lo que respecta a la teoría de campos cuánticos, sólo hay que salir y medir lo que es realmente la energía del vacío.

Y hemos medido la energía del vacío, o al menos creemos que lo hemos hecho. No es fácil de hacer; no puedes simplemente poner un vaso lleno de espacio vacío en una escala y preguntar cuánto pesa. La forma de hacerlo es buscar la influencia gravitatoria de la energía del vacío. Según la relatividad general, la energía es la fuente de la curvatura del espacio tiempo, y por lo tanto de la gravedad. La energía del espacio vacío adopta una forma particular: hay una cantidad precisamente constante en cada centímetro cúbico de espacio, que no cambia a través del universo, incluso cuando el espacio tiempo se expande o se deforma. Einstein se refirió a la energía del vacío como la *constante cosmológica*, y los cosmólogos debatieron durante mucho tiempo si su valor era exactamente cero o algún otro número.

Ese debate parece haberse resuelto en 1998, cuando los astrónomos descubrieron que el universo no sólo se está expandiendo sino que también se está acelerando. Si miras a una galaxia distante y mides la velocidad con la que está retrocediendo, esa velocidad aumenta con el tiempo. Eso sería extremadamente sorprendente si todo el universo que contiene fuera materia y radiación ordinaria, que tienen el efecto gravitatorio de juntar las cosas y reducir la velocidad de expansión. La energía positiva del vacío tiene el efecto opuesto: empuja al universo a separarse, llevando a una expansión acelerada. Dos equipos de astrónomos midieron las distancias y velocidades de las supernovas extragalácticas, esperando medir la desaceleración del universo. Lo que realmente encontraron fue que se está acelerando. La incomoda sorpresa de obtener un resultado tan inesperado fue parcialmente mejorada al ganar el Premio Nobel en 2011. (El debate "parece" haber sido resuelto, porque todavía está abierta la posibilidad de que la aceleración cósmica sea causada por algo más que la energía del vacío. Pero esa es, con mucho, la explicación principal, tanto en términos teóricos como de observación).

Podrías pensar que eso sería el final de todo. El espacio vacío tiene energía, lo hemos medido, cacao y magdalenas por todas partes.

Pero hay otra pregunta que podemos hacernos: ¿Qué deberíamos *esperar de* la energía del vacío? Es una pregunta divertida; ya que es sólo una constante de la naturaleza, tal vez no tenemos derecho a esperar que sea un valor particular en absoluto. Lo que podemos hacer, sin embargo, es una estimación rápida y sucia de lo grande que podríamos suponer que debería ser la energía del vacío. El resultado es aleccionador.

La forma tradicional de estimar la energía del vacío es distinguir entre lo que sería la clásica constante cosmológica y cómo los efectos cuánticos cambian ese valor. Eso no es realmente correcto; a la naturaleza no le importa que a los seres humanos les guste empezar de forma clásica y construir la mecánica cuántica encima de eso. La naturaleza es cuántica desde el principio. Pero ya que todo lo que intentamos hacer es obtener una estimación muy aproximada, tal vez este procedimiento esté bien.

Resulta que no está bien. La contribución cuántica a la energía del vacío es infinitamente grande. Este tipo de problema es endémico de la teoría cuántica de campos; muchos cálculos que intentamos hacer incluyendo gradualmente los efectos cuánticos terminan dándonos respuestas sin sentido, infinitamente grandes.

Pero no deberíamos tomarnos esos infinitos demasiado en serio. En última instancia, se pueden rastrear hasta el hecho de que un campo cuántico puede ser pensado como una combinación de modos de vibración en todas las diferentes longitudes de onda, desde increíblemente larga hasta cero. Si

asumimos (sin una razón especialmente buena) que la energía mínima clásica de cada modo es cero, entonces la energía del vacío del mundo real es sólo la suma de todas las energías cuánticas adicionales de cada modo. La suma de las energías cuánticas de todos esos modos es lo que nos da una energía del vacío infinita. Eso probablemente no es físicamente realista. Después de todo, a distancias muy cortas deberíamos esperar que el propio espacio tiempo se descomponga como un concepto útil, ya que la gravedad cuántica se vuelve imposible de ignorar. Podría tener más sentido incluir sólo contribuciones con longitudes de onda mayores que la longitud de Planck, por ejemplo. A esto le llamamos imponer *un límite, mirando a la teoría de* campo cuántico, pero incluyendo sólo modos con longitudes de onda mayores que una cierta distancia.

Desafortunadamente esto no arregla el problema. Si estimamos la contribución cuántica a la energía del vacío imponiendo un límite de escala de Plancks en los modos permitidos, obtenemos una respuesta finita en lugar de una infinita, pero esa respuesta es 10^{122} veces más grande que el valor que realmente observamos. Este desajuste, conocido como el *problema de la constante cosmológica*, a menudo ha sido llamado la mayor discrepancia entre la teoría y la observación en toda la física.

El problema de la constante cosmológica no es realmente un conflicto entre la teoría y la observación en sentido estricto. No tenemos nada como una predicción teórica fiable de lo que debería ser la energía del vacío. Nuestra muy errónea estimación proviene de hacer dos suposiciones dudosas: que la contribución clásica a la energía del vacío es cero, y que imponemos un límite en la escala de Planck. Siempre es posible que la contribución clásica con la que deberíamos empezar sea casi exactamente tan grande como la pieza cuántica, pero con el signo opuesto, de modo que cuando las sumamos obtenemos una energía "física" del vacío observada con un valor relativamente pequeño. No tenemos ni idea de por qué eso debería ser cierto.

El problema no es que la teoría esté en conflicto con la observación; es que nuestras expectativas aproximadas están muy lejos, lo que la mayoría de la gente toma como una pista de que algo misterioso y desconocido está en juego. Dado que la energía que estimamos era un efecto puramente cuántico-mecánico, y medimos su existencia usando su efecto gravitatorio, es plausible que no resolvamos el problema hasta que tengamos una teoría cuántica de la gravedad que funcione plenamente.

Las discusiones populares sobre la teoría de campo cuántico a menudo describirán el vacío como lleno de "fluctuaciones cuánticas", o incluso "partículas que entran y salen de la existencia en el espacio vacío". Esa es una imagen evocadora, pero es más falsa que verdadera.

En el espacio vacío descrito por el vacío de la teoría del campo cuántico, nada fluctúa en absoluto; el estado cuántico es absolutamente estacionario. La imagen de las partículas que entran y salen de la existencia es completamente diferente de la realidad, en la que el estado es precisamente el mismo de un momento a otro. Sin duda hay una contribución intrínsecamente cuántica a la energía del espacio vacío, pero es engañoso hablar de esa energía como procedente de "fluctuaciones", cuando en realidad nada está fluctuando. El sistema está sentado tranquilamente en su estado cuántico de menor energía.

¿Por qué, entonces, los físicos hablan constantemente de las fluctuaciones cuánticas? Es el mismo fenómeno que hemos observado en otros contextos: los seres humanos tenemos un impulso irresistible de pensar en *lo que vemos* como real, a pesar de que la mecánica cuántica sigue diciéndonos que lo hagamos mejor. Las teorías de las variables ocultas ceden a este impulso al hacer algo real que no sea la función de onda en suave evolución.

La mecánica cuántica de Everet es clara: el espacio vacío está descrito por un estado cuántico estacionario e invariable, donde nada sucede de un momento a otro. Pero si miráramos con suficiente cuidado, midiendo los valores de un campo cuántico en alguna pequeña región, veríamos lo que parece un desorden aleatorio. Y si volviéramos a mirar un momento después, veríamos un desorden aleatorio de aspecto diferente. La tentación de concluir que hay algo que se mueve en el espacio vacío, incluso cuando no estamos mirando, es abrumadora. Pero eso no es lo que está pasando. Más bien, estamos viendo una manifestación de lo que hablamos en el contexto del principio de incertidumbre: cuando observamos un estado cuántico, normalmente vemos algo bastante diferente de lo que era el estado antes de que miráramos.

Para llevar este punto a casa, imagina que hacemos una medición más factible experimentalmente. En lugar de medir el valor de un campo en cada punto, midamos el número total de partículas en el estado de vacío de una teoría de campo cuántico. En un mundo ideal de pensamiento-experimento, podemos imaginarnos haciendo esa medición en todo el espacio de una sola vez. Dado que por construcción estamos en el estado de menor energía, no se sorprenderá al escuchar que, con perfecta confianza, no detectaremos ninguna partícula en ningún lugar. Es sólo espacio vacío. Pero en el mundo

real, nos limitaremos a hacer un experimento en alguna región específica del espacio, como el interior de nuestro laboratorio, y a preguntar cuántas partículas hay. ¿Qué deberíamos esperar ver?

Esto no suena como una pregunta difícil. Si no hay partículas en ningún sitio, entonces ciertamente no veremos ninguna en nuestro laboratorio, ¿verdad? Desgraciadamente, no. Así no es como funciona la teoría cuántica de campos. Incluso en el estado de vacío, si nuestra sonda experimental está confinada a alguna región finita, siempre habrá una pequeña probabilidad de observar una o más partículas. Generalmente la probabilidad será muy, muy pequeña - no es algo de lo que tengamos que preocuparnos en montajes experimentales realistas - pero estará ahí. Lo contrario también es cierto: habrá estados cuánticos para los que nuestro experimento local nunca verá partículas, pero tales estados tendrán más energía en general que el estado de vacío.

Podrías estar tentado a preguntar: ¿Pero las partículas están *realmente ahí*? ¿Cómo puede haber cero partículas en el universo como un todo, y aún así podemos ver partículas cuando miramos en cualquier lugar en particular?

Pero no estamos tratando con una teoría de partículas, es una teoría de campos. Las partículas son lo que vemos cuando observamos la teoría de maneras particulares. No deberíamos preguntarnos, "¿Cuántas partículas hay realmente?" Deberíamos estar preguntando, "¿Cuáles son los posibles resultados de la medición cuando observamos un estado cuántico de esta manera específica?" Una medición de la forma "¿Cuántas partículas hay en todo el universo?" es fundamentalmente diferente de una de la forma "¿Cuántas partículas hay en esta habitación?" Tan diferente que, al igual que para la posición y el momento, ningún estado cuántico dará respuestas definitivas para ambas preguntas al mismo tiempo. El número de partículas que vemos no es una realidad absoluta, depende de cómo veamos el estado.

Esto nos lleva directamente a una importante propiedad de la teoría cuántica de campos: el entrelazamiento entre partes del campo en diferentes regiones del espacio.

Imagina que divides el universo en dos regiones dibujando un plano imaginario en algún lugar del espacio. Llama a las regiones "izquierda" y "derecha" por conveniencia. Clásicamente, ya que los campos viven en todas partes, para construir cualquier configuración de campo particular tendríamos que especificar lo que el campo está haciendo tanto en la región izquierda como en la región derecha. Si hay un desajuste en el valor de los campos a través del límite, eso corresponderá a una aguda discontinuidad en el perfil del campo en general. Eso es concebible, pero cuesta energía que el campo cambie de un punto a otro, por lo que un salto discontinuo implica una gran cantidad de energía en ese punto. Por eso las configuraciones de campo ordinarias tienden a variar suavemente, en lugar de repentinamente.

En el nivel cuántico, la clásica afirmación "El valor del campo tiende a coincidir a través del límite" se convierte en "Los campos de las regiones izquierda y derecha tienden a estar muy enredados entre sí". Podemos considerar estados cuánticos en los que las dos regiones están desenredadas, pero habría una cantidad infinita de energía en el límite.

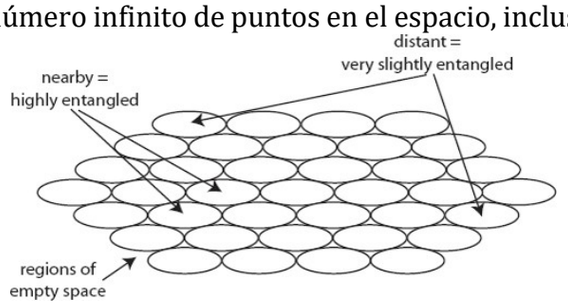
Este razonamiento se extiende más allá. Imagina que divides todo el espacio en cajas de igual tamaño. Clásicamente, el campo haría algo en cada caja, pero para evitar densidades infinitas de energía los valores deben coincidir en los límites entre las cajas. Por lo tanto, en la teoría de campos cuánticos, lo que ocurre en una caja debe estar muy enredado con lo que ocurre en las cajas vecinas.

Eso no es todo. Si una caja está enredada con sus vecinos, y esas cajas vecinas están enredadas con sus vecinos, es lógico que los campos de nuestra caja original deberían estar enredados no sólo con sus vecinos, sino con los campos a una caja de distancia. (Eso no es lógicamente necesario, pero parece razonable en este caso, y un cálculo cuidadoso afirma que es verdad.) Habrá mucho menos enredos con los campos a una caja de distancia que para los vecinos directos, pero aún habrá algunos allí. Y de hecho este patrón continúa en todo el espacio: los campos de cualquier caja están enredados con los campos de todas las demás cajas del universo, aunque la cantidad de entrelazamiento se hace cada vez menor al considerar las cajas que están cada vez más separadas.

Eso puede parecer una exageración, ya que después de todo hay un número infinito de cajas en un universo infinitamente grande. ¿Pueden los campos de una pequeña región, digamos, un solo centímetro cúbico, realmente enredarse con campos de cada dos centímetros cúbicos del universo?

Sí, pueden. En la teoría del campo, incluso un solo centímetro cúbico (o una caja de cualquier otro tamaño) contiene un número infinito de grados de libertad. Recuerden que definimos un grado *de libertad* en el capítulo cuatro como un número necesario para especificar el estado de un sistema, como "posición" o "giro". En la teoría del campo, hay un número infinito de grados de libertad en

cualquier región finita: en cada punto del espacio, el valor del campo en ese punto es un grado de libertad separado. Y hay un número infinito de puntos en el espacio, incluso en una región pequeña.



Mecánicamente cuántica, el espacio de todas las posibles funciones de onda de un sistema es el espacio Hilbert de ese sistema. Así que el espacio de Hilbert que describe cualquier región en la teoría de campo cuántico es de dimensiones infinitas, porque hay un número infinito de grados de libertad. Como veremos, eso podría no seguir siendo cierto en la teoría correcta de la realidad; hay razones para pensar que la gravedad cuántica sólo tiene un número finito de grados de libertad en una región. Pero la teoría de campo cuántico, sin gravedad, permite infinitas posibilidades en cualquier pequeña caja.

Esos grados de libertad comparten mucho con los grados de libertad en otras partes del espacio. Para llevar a casa cuánto, imagina comenzar con el estado de vacío, tomar una de esas cajas de un centímetro cúbico, y hurgar en los campos cuánticos del interior. Por "pinchar" nos referimos a cualquier forma que podamos imaginar que afecta al campo sólo en esa región local, midiéndolo o interactuando con él. Sabemos que medir un estado cuántico lo cambia a otro estado (de hecho, a diferentes estados en cada rama de la nueva función de onda). ¿Cree usted que metiendo el estado estrictamente dentro de una caja dada, es posible cambiar instantáneamente el estado fuera de la caja?

Si conoces un poco de relatividad, podrías estar tentado a responder "no", ya que cualquier efecto tardaría en propagarse a regiones lejanas. Pero entonces recuerdas el experimento de pensamiento EPR, en el que la medición de Alice en un espín puede afectar al estado cuántico del espín de Bob, sin importar lo lejos que estén el uno del otro. El enredo es el ingrediente secreto. Y acabamos de decir que el estado de vacío en la teoría de campo cuántico está muy enredado, de tal manera que cada caja está enredada con todas las demás cajas. Gradualmente comenzarás a preguntarte si pinchar el campo en una caja podría causar cambios drásticos en el resto del estado, incluso muy lejos.

De hecho, puede. Al pinchar un campo cuántico en una pequeña región del espacio, es posible convertir el estado cuántico de todo el universo en *literalmente cualquier estado*. Técnicamente este resultado se conoce como el teorema de *Reeh-Schlieder*, pero también se ha llamado el *teorema del Taj Mahal*. Eso es porque implica que sin salir de mi habitación, puedo hacer un experimento y obtener un resultado que implica que ahora, de repente, hay una copia del Taj Mahal en la luna. (O en cualquier otro edificio, en cualquier otro lugar del universo.)

No te emociones demasiado. No podemos forzar a propósito la creación del Taj Mahal, o traer a la existencia algo en particular. En el ejemplo de EPR, Alice puede medir su giro, pero no puede garantizar el resultado de esa medición. El teorema de Reeh-Schlieder implica que si medimos los campos cuánticos localmente, hay algún resultado de la medición que podríamos obtener que estaría asociado con un Taj Mahal de repente en la Luna. Pero no importa cuánto lo intentemos, la probabilidad de obtener ese resultado será muy, muy, muy pequeña. Casi todo el tiempo, una medición local deja partes distantes del mundo prácticamente inalteradas. Como muchos resultados notables en la mecánica cuántica, no es una preocupación práctica.

Una discusión popular después de la cena entre ciertos círculos es "¿Debemos sorprendernos por el teorema de Reeh-Schlieder, o no?" Ciertamente parece sorprendente que podamos hacer una medición en nuestro sótano que convierta el estado del universo en literalmente cualquier cosa. Lo más sorprendente es que eso está ahí arriba. Pero el otro lado argumenta que una vez que entiendes el enredo, y aprecias que las cosas pueden ser técnicamente posibles pero son tan increíblemente improbables que realmente no importa, no deberíamos estar muy sorprendidos después de todo. Visto de la manera correcta, el potencial para un Taj Mahal en la Luna estuvo ahí todo el tiempo, en alguna pequeña parte del estado cuántico. Nuestro experimento simplemente lo sacó del vacío ramificando la función de la onda de manera apropiada.

Creo que está bien que te sorprendan. Pero lo más importante es que debemos apreciar la riqueza y la complejidad del vacío. En la teoría de campos cuánticos, incluso el espacio vacío es un lugar emocionante para estar.

13

Respirar en el espacio vacío

Encontrar la gravedad dentro de la Mecánica Cuántica

La teoría cuántica de campos es capaz de explicar con éxito todos los experimentos realizados por los seres humanos. Cuando se trata de describir la realidad, es el mejor enfoque que tenemos. Por lo tanto, es extremadamente tentador imaginar que las futuras teorías físicas se establecerán dentro del amplio paradigma de la teoría de campo cuántico, o tal vez pequeñas variaciones de la misma.

Pero la gravedad, al menos cuando se hace fuerte, no parece estar bien descrita por la teoría de campo cuántico. Así que en este capítulo nos preguntaremos si podemos avanzar atacando el problema desde un ángulo diferente.

Siguiendo a Feynman, a los físicos les encanta recordarse unos a otros que nadie entiende realmente la mecánica cuántica. Mientras tanto, se han lamentado durante mucho tiempo de que nadie entienda la gravedad cuántica. Tal vez estas dos carencias de comprensión están relacionadas. La gravedad, que describe el estado del propio espacio tiempo en lugar de sólo partículas o campos que se mueven dentro del espacio tiempo, presenta retos especiales cuando intentamos describirla en términos cuánticos. Tal vez eso no debería ser sorprendente, si no creemos que entendemos completamente la mecánica cuántica en sí misma. Es posible que el pensamiento sobre los fundamentos de la teoría cuántica, en particular, la perspectiva de muchos mundos de que el mundo es sólo una función de onda, y todo lo demás emerge de ella, arroje nueva luz sobre cómo el espacio tiempo curvo emerge de los fundamentos cuánticos.

Nuestra tarea autoproclamada es una de ingeniería inversa. En lugar de tomar la relatividad general clásica y cuantificarla, trataremos de encontrar la gravedad dentro de la mecánica cuántica. Es decir, tomaremos los ingredientes básicos de la teoría cuántica -funciones de onda, la ecuación de Schrödinger, el enredo- y nos preguntaremos bajo qué circunstancias podemos obtener ramas emergentes de la función de onda que parecen campos cuánticos que se propagan en un espacio tiempo curvo.

Hasta este punto en el libro, básicamente todo lo que hemos hablado es o bien una doctrina bien entendida y establecida (como los fundamentos de la mecánica cuántica), o al menos una hipótesis plausible y respetable (el enfoque de Muchos Mundos). Ahora hemos llegado al límite de lo que se entiende con seguridad, y nos aventuraremos en un territorio inexplorado. Veremos ideas especulativas que podrían ser importantes para entender el espacio tiempo cuántico y la cosmología. Pero puede que no lo sean. Sólo años, posiblemente décadas, de investigación adicional revelarán la respuesta con alguna confianza. Por supuesto, tomemos estas ideas como provocaciones para seguir pensando, y mantengamos un ojo en donde va la discusión en los tiempos venideros, pero tengamos en cuenta la incertidumbre intrínseca que viene con la lucha con los problemas difíciles en el borde de nuestra comprensión.

Albert Einstein le dijo a un colega: "En la teoría cuántica uso más grasa cerebral que la relatividad". Pero fueron sus contribuciones a la relatividad las que lo convirtieron en una superestrella intelectual.

Al igual que la "mecánica cuántica", la "relatividad" no se refiere a una teoría física específica, sino más bien a un marco dentro del cual se pueden construir teorías. Las teorías que son "relativistas" comparten una imagen común de la naturaleza del espacio y el tiempo, una en la que el mundo físico se describe por los acontecimientos que suceden en un único "espacio tiempo" unificado. Incluso antes de la relatividad, todavía era posible hablar del espacio tiempo en la física newtoniana: hay un espacio tridimensional, y una dimensión de tiempo, y para localizar un evento en el universo hay que especificar tanto dónde está el evento en el espacio como cuándo ocurre en el tiempo. Pero antes de Einstein, no había mucha motivación para combinarlos en un único concepto cuatridimensional. Una vez que la relatividad apareció, se convirtió en un paso natural.

Hay dos grandes ideas que se llaman "la teoría de la relatividad", la teoría especial y la teoría general. La relatividad *especial*, que se unió en 1905, se basa en la idea de que todo el mundo mide la luz para viajar a la misma velocidad en el espacio vacío. La combinación de esa idea con la insistencia

de que no existe un marco de movimiento absoluto nos lleva directamente a la idea de que el tiempo y el espacio son "relativos". El espacio-tiempo es universal y acordado por todos, pero la forma en que lo dividamos en "espacio" y "tiempo" será diferente para los distintos observadores.

La relatividad especial es un marco que incluye muchas teorías físicas específicas, todas ellas llamadas "relativistas". El electromagnetismo clásico, elaborado por James Clerk Maxwell en la década de 1860, es una teoría relativista aunque fue inventada antes que la relatividad; la necesidad de comprender mejor las simetrías del electromagnetismo fue una fuerza impulsora de por qué se inventó la relatividad en primer lugar. (A veces la gente usa mal la palabra "clásica" para incluir "no relativista", pero es mejor reservarla para significar "no cuántico"). La mecánica cuántica y la relatividad especial son 100 por ciento compatibles entre sí. Las teorías de campo cuántico utilizadas en la física de partículas moderna son relativistas en sus núcleos.

La otra gran idea de la relatividad llegó diez años después, cuando Einstein propuso *la relatividad general*, su teoría de la gravedad y el espacio tiempo curvo. La idea crucial era que el espacio tiempo cuatridimensional no es sólo un fondo estático en el que tienen lugar las partes interesantes de la física; tiene vida propia. El espacio tiempo puede curvarse y deformarse, y lo hace en respuesta a la presencia de materia y energía. Crecemos aprendiendo sobre la geometría plana descrita por Euclides, en la que las líneas inicialmente paralelas permanecen paralelas para siempre y los ángulos dentro de un triángulo siempre suman 180 grados. El espacio tiempo, se dio cuenta Einstein, tiene una geometría no euclidiana, en la que estos hechos venerables ya no son el caso. Los rayos de luz inicialmente paralelos, por ejemplo, pueden ser enfocados juntos mientras se mueven a través del espacio vacío. Los efectos de esta deformación de la geometría son lo que reconocemos como "gravedad". La relatividad general vino con numerosas consecuencias alucinantes, como la expansión del universo y la existencia de agujeros negros, aunque a los físicos les ha llevado mucho tiempo apreciar cuáles son esas consecuencias.

La relatividad especial es un marco, pero la relatividad general es una teoría específica. Al igual que las leyes de Newton gobiernan la evolución de un sistema clásico o la ecuación de Schrödinger gobierna la evolución de una función de onda cuántica, Einstein dedujo una ecuación que gobierna la curvatura del espacio tiempo. Al igual que con la ecuación de Schrödinger, es divertido ver la ecuación de Einstein escrita, aunque no nos preocupemos por todos los detalles:

$$R\mu\nu-(_{½)Rg\mu\nu} = {}_{8\pi GT\mu\nu}$$

Las matemáticas detrás de la ecuación de Einstein son formidables, pero la idea básica es simple, y fue resumida de manera descabellada por John Wheeler: la materia le dice al espacio-tiempo cómo curvarse, y el espacio-tiempo le dice a la materia cómo moverse. El lado izquierdo mide la curvatura del espaciotiempo, mientras que el lado derecho caracteriza cantidades similares a la energía, incluyendo el momento, la presión y la masa.

La relatividad general es clásica. La geometría del espacio tiempo es única, evoluciona de forma determinante y, en principio, puede medirse con una precisión arbitraria sin perturbarla. Una vez que apareció la mecánica cuántica, era perfectamente natural tratar de "cuantificar" la relatividad general, obteniendo una teoría cuántica de la gravedad. Es más fácil decirlo que hacerlo. Lo que hace especial a la relatividad es que es una teoría del espacio tiempo más que una teoría de cosas dentro del espacio tiempo. Otras teorías cuánticas describen funciones de onda que asignan probabilidades a la observación de cosas en lugares definidos y bien definidos del espacio y momentos del tiempo. La gravedad cuántica, por el contrario, tendrá que ser una teoría cuántica del propio espacio tiempo. Esto plantea algunas cuestiones.

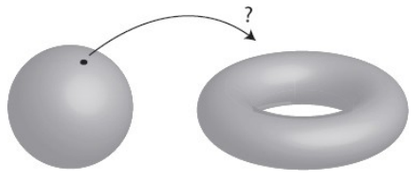
Einstein, naturalmente, fue uno de los primeros en apreciar el problema. En 1936, reflexionó sobre la dificultad de imaginar cómo aplicar los principios de la mecánica cuántica a la naturaleza del espacio tiempo:

> Tal vez el éxito del método de Heisenberg apunta a un método puramente algebraico de descripción de la naturaleza, es decir, a la eliminación de las funciones continuas de la física. Sin embargo, también debemos renunciar, por principio, al continuo espacio-tiempo. No es inimaginable que el ingenio humano encuentre algún día métodos que permitan avanzar por ese camino. En la actualidad, sin embargo, tal programa parece un intento de respirar en el espacio vacío.

Aquí Einstein está contemplando el acercamiento de Heisenberg a la teoría cuántica, que recordarán que proporcionó una descripción en términos de saltos cuánticos explícitos sin intentar rellenar los detalles sobre los procesos microscópicos que ocurren a lo largo del camino. Preocupaciones similares persisten si cambiamos a un punto de vista más Schrödingeriano con las

funciones de onda. Presumiblemente necesitaríamos una función de onda que asigne amplitudes a diferentes geometrías posibles del espacio tiempo. Pero si imaginamos, por ejemplo, dos ramas de dicha función de onda que describen diferentes geometrías del espacio-tiempo, no existe una forma única de especificar que dos eventos en las dos ramas corresponden al "mismo" punto en el espacio-tiempo. No hay un mapa único, en otras palabras, entre dos geometrías diferentes.

Considere una esfera bidimensional y un toro. Imagina que un amigo tuyo elige un punto en una esfera, y luego te pide que elijas "el mismo" punto en el toro. Estarías bloqueado, y por una buena razón; no hay forma de hacerlo.



Aparentemente, el espacio tiempo no puede jugar el mismo papel central en la gravedad cuántica que en el resto de la física. No hay un solo espacio tiempo, hay una superposición de muchas geometrías de espacio tiempo diferentes. No podemos preguntarnos cuál sería la probabilidad de encontrar un electrón en un determinado punto del espacio, ya que no hay una forma objetiva de especificar de qué punto estamos hablando.

La gravedad cuántica, entonces, viene con un conjunto de cuestiones conceptuales que la distinguen de otras teorías de mecánica cuántica. Estas cuestiones pueden tener importantes ramificaciones para la naturaleza de nuestro universo, incluyendo la cuestión de qué pasó al principio, o si hubo un principio en absoluto. Podemos incluso preguntarnos si el espacio y el tiempo son en sí mismos fundamentales, o si emergen de algo más profundo.

Al igual que los fundamentos de la mecánica cuántica, el campo de la gravedad cuántica fue relativamente ignorado durante décadas, ya que los físicos se concentraron en otras cosas. No completamente; Hugh Everett se inspiró para proponer el enfoque de Muchos Mundos en parte pensando en la teoría cuántica de todo el universo, donde la gravedad juega un papel importante, y su mentor, John Wheeler, se preocupó por el problema durante años. Pero incluso dejando a un lado las cuestiones conceptuales, otros obstáculos se interpusieron en el camino de hacer serios progresos en la cuantificación de la gravedad.

Un obstáculo importante es la dificultad de obtener datos experimentales directos. La gravedad es una fuerza muy débil; la repulsión eléctrica entre dos electrones es unas 10^{43} veces más fuerte que su atracción gravitatoria. En cualquier experimento realista que involucre sólo unas pocas partículas, donde podríamos esperar que los efectos cuánticos sean visibles, la fuerza de la gravedad es completamente insignificante comparada con otras influencias. Podemos imaginarnos la construcción de un acelerador de partículas lo suficientemente potente como para hacer chocar las partículas entre sí en la energía de Planck, donde la gravedad cuántica debería ser importante. Desafortunadamente, si simplemente ampliamos la tecnología de las máquinas actuales, el acelerador resultante tendría que tener años luz de diámetro. No es un proyecto de construcción factible en este momento.

También hay problemas técnicos con la teoría misma, además de los conceptuales que acabamos de mencionar. La relatividad general es una teoría de campo clásica. El campo involucrado se llama la *métrica*. (El símbolo $g_{\mu\nu}$ en el centro de la ecuación de Einstein representa la métrica, y las otras cantidades dependen de ella). La palabra "métrica" deriva en última instancia del griego *metron*, "algo que se utiliza para medir", y eso es exactamente lo que el campo métrico nos permite hacer. Dado un camino a través del espacio-tiempo, la métrica nos dice la distancia a lo largo de ese camino. La métrica esencialmente actualiza el teorema de Pitágoras, que funciona en la geometría plana de Euclides pero que debe generalizarse cuando el espacio-tiempo se curva. Conocer la longitud de cada curva es suficiente para fijar la geometría del espacio tiempo en cada punto.

El espacio tiempo tiene una métrica incluso en relatividad especial, o para el caso de la física newtoniana. Pero esa métrica es rígida, invariable y plana - la curvatura del espacio tiempo es cero en cada punto. La gran idea de la relatividad general fue convertir el campo métrico en algo dinámico y afectado por la materia y la energía. Podemos intentar cuantificar ese campo como lo haríamos con cualquier otro. Las pequeñas ondas en el campo gravitatorio cuantificado se parecen a las partículas llamadas *gravitones*, al igual que las ondas en el campo electromagnético se parecen a los fotones.

Nadie ha detectado nunca un gravitón, y es posible que nadie lo haga nunca, ya que la fuerza gravitatoria es tan increíblemente débil. Pero si aceptamos los principios básicos de la relatividad general y la mecánica cuántica, la existencia de los gravitones es inevitable.

Podemos preguntarnos qué pasa cuando los gravitones se dispersan entre sí o con otras partículas. Lamentablemente, lo que encontramos es que la teoría predice tonterías, si es que predice algo. Se necesita un número infinito de parámetros de entrada para calcular cualquier cantidad de interés en particular, así que la teoría no tiene poder de predicción. Podemos restringir nuestra atención a una "efectiva" teoría de campo de la gravedad, en la que por decreto limitamos nuestra atención a las longitudes de onda largas y a las bajas energías. Eso es lo que nos permite calcular el campo gravitatorio en el sistema solar, incluso en la gravedad cuántica. Pero si queremos una teoría del todo, o al menos una teoría de la gravedad que sea válida para todas las energías posibles, estamos atascados. Se necesita algo dramático.

El enfoque contemporáneo más popular de la gravedad cuántica es la teoría de *las cuerdas*, que reemplaza las partículas por pequeños bucles o segmentos de "cuerda" unidimensionales. (No preguntes de qué están hechas las cuerdas, las cuerdas son de lo que está hecho todo lo demás.) Las cuerdas en sí son increíblemente pequeñas, tanto que parecen partículas cuando las observamos a distancia.

La teoría de las cuerdas se propuso inicialmente para ayudar a entender la fuerza nuclear fuerte, pero no funcionó. Uno de los problemas fue que la teoría inevitablemente predice la existencia de partículas que se ven y se comportan exactamente como los gravitones. Eso fue percibido inicialmente como una molestia, pero muy pronto los físicos pensaron para sí mismos, "Hmm, la gravedad realmente existe. ¿Quizás la teoría de cuerdas es una teoría cuántica de la gravedad?" Eso resulta ser cierto, y aún mejor hay una ventaja: la teoría hace predicciones finitas para todas las cantidades físicas, sin necesidad de un número infinito de parámetros de entrada. La popularidad de las cuerdas explotó en 1984 cuando Michael Green y John Schwarz demostraron que la teoría es matemáticamente consistente.

Hoy en día, la teoría de cuerdas es el enfoque más perseguido para explorar la gravedad cuántica por un amplio margen, aunque otras ideas mantienen sus adeptos. El segundo enfoque más popular es la *gravedad cuántica de bucle*, que comenzó como una forma de cuantificar directamente la relatividad general mediante el uso de una inteligente elección de variables; en lugar de observar la curvatura del espacio tiempo en cada punto, consideramos cómo se rotan los vectores cuando viajan alrededor de bucles cerrados en el espacio. (Si el espacio es plano, no rotan en absoluto, mientras que si el espacio es curvo, pueden rotar mucho). La teoría de las cuerdas aspira a ser una teoría de todas las fuerzas y la materia a la vez, mientras que la gravedad cuántica de bucles sólo apunta a la propia gravedad. Desafortunadamente, los obstáculos para reunir datos experimentales relevantes para la gravedad cuántica son igualmente formidables para todas las alternativas, por lo que estamos atascados sin saber realmente qué enfoque (si es que hay alguno) está en el camino correcto.

Aunque la teoría de cuerdas ha tenido cierto éxito en el tratamiento de los problemas técnicos de la gravedad cuántica, no ha arrojado mucha luz sobre los problemas conceptuales. De hecho, una forma de pensar sobre los diferentes enfoques dentro de la comunidad de la gravedad cuántica es preguntarse cómo deberíamos pensar sobre el lado conceptual de las cosas. Es probable que un teórico de cuerdas crea que si nos ocupamos de todas las cuestiones técnicas, los problemas conceptuales acabarán por resolverse solos. Alguien que piense lo contrario podría ser empujado hacia la gravedad cuántica de bucle u otro enfoque alternativo. Cuando los datos no apuntan en una dirección o en otra, las opiniones tienden a arraigarse profundamente.

La teoría de cuerdas, la gravedad cuántica de bucles y otras ideas comparten un patrón común: empiezan con un conjunto de variables clásicas, luego se cuantifican. Desde la perspectiva que hemos estado siguiendo en este libro, eso es un poco atrás. La naturaleza es cuántica desde el principio, descrita por una función de onda que evoluciona según una versión apropiada de la ecuación de Schrödinger. Cosas como "espacio" y "campos" y "partículas" son formas útiles de hablar de esa función de onda en un límite clásico apropiado. No queremos empezar con el espacio y los campos y cuantificarlos; queremos extraerlos de una función de onda intrínsecamente cuántica.

¿Cómo podemos encontrar el "espacio" dentro de una función de onda? Queremos identificar características de la función de onda que se asemejen al espacio tal como lo conocemos, y en particular algo que corresponda a una métrica que defina las distancias. Así que pensemos en cómo se muestran

las distancias en la teoría ordinaria del campo cuántico. Para simplificar, pensemos en las distancias en el espacio; hablaremos más tarde sobre cómo el tiempo podría entrar en el juego.

Hay un lugar obvio en el que las distancias aparecen en la teoría cuántica de campos, que hemos visto en el último capítulo: en el espacio vacío, los campos de diferentes regiones están entrelazados entre sí, y las regiones que están lejos están menos entrelazadas que las que están cerca. A diferencia del "espacio", el concepto de "entrelazamiento" siempre está disponible para nosotros en cualquier función de onda cuántica abstracta. Así que tal vez podamos comprar algo aquí, mirando la estructura de entrelazamiento de los estados y usando eso para definir las distancias. Lo que necesitamos es una medida cuantitativa de lo enredado que está un subsistema cuántico. Afortunadamente, tal medida existe: es la entropía.

John von Neumann mostró cómo la mecánica cuántica introduce una noción de entropía que es paralela a la definición clásica. Como explicó Ludwig Boltzmann, comenzamos con un conjunto de constituyentes que pueden mezclarse de varias maneras, como los átomos y las moléculas en un fluido. La entropía es entonces una forma de contar el número de formas en que esos constituyentes pueden ser dispuestos sin cambiar la apariencia macroscópica del sistema. La entropía está relacionada con la ignorancia: los estados de alta entropía son aquellos para los que no sabemos mucho sobre los detalles microscópicos de un sistema sólo por conocer sus características observables.

La entropía de Von Neumann, por su parte, es de naturaleza puramente mecánica cuántica, y surge del enredo. Consideremos un sistema cuántico que se divide en dos partes. Podrían ser dos electrones, o los campos cuánticos en dos regiones diferentes del espacio. El sistema en su conjunto se describe por una función de onda, como es habitual. Tiene algún estado cuántico definido, aunque sólo podamos predecir los resultados de las mediciones de forma probabilística. Pero mientras las dos partes estén enmarañadas, sólo existe una función de onda para el conjunto, no una función de onda separada para cada parte. Las partes, en otras palabras, no están en estados cuánticos definidos propios.

Von Neumann demostró que, para muchos propósitos, el hecho de que los subsistemas enmarañados no tengan funciones de onda definidas propias es análogo a tener una función de onda, pero simplemente no sabemos qué es. Los subsistemas cuánticos, en otras palabras, se parecen mucho a la situación clásica en la que hay muchos estados posibles que parecen macroscópicamente iguales. Y esta incertidumbre puede ser cuantificada en lo que ahora llamamos la *entropía del entrelazamiento*. Cuanto mayor es la entropía de un subsistema cuántico, más se enreda con el mundo exterior.

Piensa en dos qubits, uno que pertenece a Alice y el otro a Bob. Puede ser que estén desenredados, así que cada qubit tiene su propia función de onda, por ejemplo, una superposición igual de spin-up y spin-down. En ese caso, la entropía de enredo de cada qubit es cero. Incluso si sólo podemos predecir los resultados de las mediciones de forma probabilística, cada subsistema sigue estando en un estado cuántico definido.

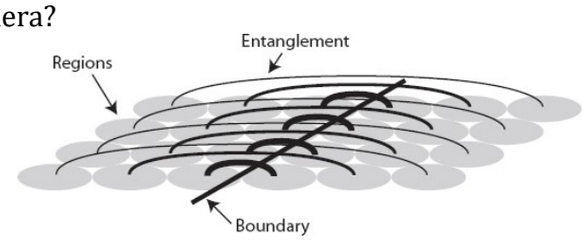
Pero imagina que los dos qubits están enredados, en una superposición igual de "ambos qubits son spin-up" y "ambos qubits son spin-down". El qubit de Alice no tiene su propia función de onda, porque está enredado con el de Bob. De hecho, Bob pudo realizar una medición de su spin, ramificando la función de onda, de modo que ahora hay dos copias de Alice, cada una de las cuales tiene un spin en un estado definido. Pero ninguna de las dos copias de Alicia sabe en qué estado se encuentra; está en un estado de ignorancia, en el que lo mejor que puede hacer es decir que hay un 50% de posibilidades de que su qubit sea spin-up o spin-down. Nótese la sutil diferencia: El qubit de Alicia no está en una superposición cuántica donde no sabe cuál será el resultado de la medición; está en un estado en cada rama que dará un resultado de medición definitivo, pero no sabe en qué estado está. Por lo tanto, describimos su qubit como si tuviera una entropía distinta de cero. La idea de Von Neumann era que debíamos atribuir una entropía distinta de cero al qubit de Alicia incluso antes de que Bob midiera el suyo, porque después de todo ella ni siquiera sabe si él ha hecho una medición. Esa es la entropía del enredo.

Veamos cómo aparece la entropía de los enredos en la teoría cuántica de campos. Olvidándonos de la gravedad por un segundo, consideremos una región de espacio vacío en el estado de vacío, especificado por un límite que separa el interior de la región del exterior. El espacio vacío es un lugar de rica textura, lleno de grados cuánticos de libertad que podemos pensar como modos de campos vibratorios. Los modos dentro de la región estarán enredados con los modos fuera, por lo que la región tiene una entropía asociada a ella, incluso si el estado general es simplemente el vacío.

Incluso podemos calcular lo que es esa entropía. La respuesta es: el infinito. Esta es una complicación común con la teoría cuántica de campos, que muchas preguntas de aparente relevancia

física tienen respuestas aparentemente infinitas porque hay un número infinito de formas posibles para que un campo vibre. Pero al igual que hicimos con la energía del vacío en el último capítulo, podemos preguntarnos qué sucede cuando imponemos un corte, permitiendo sólo modos más largos que una cierta longitud de onda. La entropía resultante es finita, y resulta ser naturalmente proporcional al área del límite de la región. La razón no es difícil de entender: las vibraciones de campo en una parte del espacio están enredadas con regiones de todo el mundo, pero la mayor parte del enredo se concentra en las regiones cercanas. La entropía total de una región de espacio vacío depende de la cantidad de enredos a través de la frontera, que es proporcional a lo grande que es esa frontera, su área.

Esa es una característica intrigante de la teoría de campo cuántico. Si se elige una región dentro del espacio vacío, la entropía de esa región es proporcional al área de su límite. Eso relaciona por un lado una cantidad geométrica, el área de una región, con una cantidad de "materia", la entropía contenida en su interior. Todo esto suena vagamente parecido a la ecuación de Einstein, que también conecta la geometría (la curvatura del espacio tiempo) con una cantidad de materia (energía). ¿Están relacionados de alguna manera?



Podrían ser, como se señaló en un provocativo artículo de 1995 de Ted Jacobson, un ingenioso físico de la Universidad de Maryland. En la teoría ordinaria de campos cuánticos sin gravedad, la entropía es proporcional al área en el estado de vacío, pero en los estados de mayor energía no tiene por qué serlo. Jacobson postuló que hay algo especial en la gravedad: cuando se incluye la gravedad, la entropía de una región es *siempre proporcional* a su área límite. Eso no es en absoluto lo que esperaríamos en la teoría de campos cuánticos, pero tal vez ocurre una vez que la gravedad entra en juego. Podemos imaginar que podría ser el caso, y ver lo que sucede.

Lo que sucede es bastante maravilloso. Jacobson postuló que el área de una superficie es proporcional a la entropía de la región que encierra. El área es una cantidad geométrica; no podemos calcular el área de una superficie sin saber algo sobre la geometría del espacio del que forma parte. Jacobson observó que podíamos relacionar el área de una superficie muy pequeña con la misma cantidad geométrica que aparece en el lado izquierdo de la ecuación de Einstein. Mientras tanto, la entropía nos dice algo sobre la "materia", entendida en sentido amplio; sobre la materia que vive en el espacio tiempo. El concepto de entropía surgió originalmente dentro de la termodinámica, donde se relacionaba con el calor que sale de un sistema. Y el calor es una forma de energía. Jacobson también argumentó que esta entropía podría estar directamente relacionada con el término energía que aparece en el lado derecho de la ecuación de Einstein. A través de estas maniobras fue capaz de *derivar* la ecuación de Einstein para la relatividad general, en lugar de postularla directamente, como hizo Einstein.

Para decir lo mismo más directamente, consideramos una pequeña región en el espacio tiempo plano. Tiene algo de entropía, porque los modos dentro de la región están enredados con los de fuera. Ahora imaginemos que cambiamos un poco el estado cuántico, de modo que disminuimos la cantidad en la que esa región está enredada, y por lo tanto disminuimos su entropía.

esa región se enreda, y por lo tanto disminuye su entropía. En la imagen de Jacobson, el área que limita nuestra región cambia en respuesta, reduciéndose un poco. Y muestra que esta respuesta de la geometría del espacio tiempo a un cambio en el estado cuántico es equivalente a la ecuación de Einstein de la relatividad general, relacionando la curvatura con la energía.

Este fue el comienzo de una oleada de interés en lo que ahora se denomina gravedad "entrópica" o "termodinámica"; otras contribuciones importantes fueron hechas por Thanu Padmanabhan (2009) y Erik Verlinde (2010). El comportamiento del espacio tiempo en relatividad general puede ser pensado simplemente como la tendencia natural de los sistemas a moverse hacia configuraciones de mayor entropía.

Este es un cambio de perspectiva bastante radical. Einstein pensó en términos de energía, una cantidad definida asociada con configuraciones particulares de la materia en el universo. Jacobson y otros han argumentado que podemos llegar a las mismas conclusiones pensando en la entropía, un fenómeno colectivo que surge de la interacción mutua de muchos pequeños componentes de un sistema. Este simple cambio de enfoque podría ofrecer un camino crucial en nuestra búsqueda para descubrir una teoría fundamentalmente cuántica de la gravedad.

Jacobson no estaba proponiendo una teoría de la gravedad cuántica; estaba apuntando a una nueva forma de derivar la ecuación de Einstein para la relatividad general clásica, con los campos cuánticos actuando como fuente de energía. La aparición de palabras como "área" y "región del espacio" debería indicarnos que la discusión anterior trataba el espacio tiempo como algo tangible y clásico. Pero dado el papel central que juega la entropía del enredo en su derivación, es natural preguntarse si podríamos adaptar las ideas básicas a un enfoque que es más intrínsecamente cuántico desde el principio, en el que el propio espacio emerge de la función de onda.

En muchos mundos, la función de onda es sólo un vector abstracto que vive dentro de la construcción matemática superalta del espacio de Hilbert. Normalmente hacemos funciones de onda empezando con algo clásico y cuantificándolo, lo que nos da una idea inmediata de lo que se supone que representa la función de onda, las partes básicas a partir de las cuales se construye. Pero aquí no tenemos tal lujo. Todo lo que tenemos es el estado en sí mismo y la ecuación de Schrödinger. Hablamos abstractamente de "grados de libertad", pero no son la versión cuantizada de ninguna materia clásica fácilmente identificable, sino la esencia mecánica cuántica de la que surge el espacio-tiempo y todo lo demás. John Wheeler solía hablar de la idea de "It from Bit", sugiriendo que el mundo físico surgió (de alguna manera) de la información. En estos días, cuando el principal foco de atención es el entrelazamiento de grados cuánticos de libertad, nos gusta hablar de "It from Qubit".

Si miramos atrás en la ecuación de Schrödinger, dice que la velocidad a la que la función de onda cambia con el tiempo está gobernada por el Hamiltoniano. Recuerda que el Hamiltoniano es una forma de describir cuánta energía contiene el sistema, y es una forma compacta de capturar toda la dinámica del sistema. Una característica estándar de los Hamiltonianos en el mundo real es que los subsistemas de localidades dinámicas interactúan con otros subsistemas sólo cuando están cerca unos de otros, no cuando están lejos. Las influencias pueden viajar a través del espacio, pero sólo a velocidades menores o iguales a la velocidad de la luz. Así que un evento en un momento determinado sólo afecta inmediatamente a lo que está pasando en su ubicación actual.

Con el problema que nos hemos asignado, ¿cómo surge el espacio de una función de onda cuántica abstracta?, no tenemos la conveniencia de empezar con las partes individuales y preguntar cómo interactúan. Sabemos lo que significa "tiempo" en este contexto - está justo ahí en la ecuación de Schrödinger, la letra *t* - *pero* no tenemos partículas, ni campos, ni siquiera lugares en un mundo tridimensional. Estamos atrapados respirando en el espacio vacío, y necesitamos buscar oxígeno donde podamos encontrarlo.

Afortunadamente, este es un caso en el que la ingeniería inversa funciona bastante bien. En lugar de empezar con piezas individuales de un sistema y preguntar cómo interactúan, podemos ir al revés: Dado el sistema en su conjunto (la función de onda cuántica abstracta) y su Hamiltoniano, ¿hay alguna forma sensata de dividirlo en subsistemas? Es como comprar pan de molde toda la vida, y luego recibir un pan sin cortar. Hay muchas maneras en las que podríamos imaginarnos rebanándolo; ¿hay alguna manera en particular que sea claramente la mejor?

Sí, lo hay, si creemos que la localidad es una característica importante del mundo real. Podemos abordar el problema poco a poco, o qubit a qubit, en cualquier caso.

Un estado cuántico genérico puede pensarse como una superposición de un conjunto de estados base con energía fija definida. (Al igual que un estado genérico de un electrón en rotación puede

pensarse como una superposición de un electrón que es definitivamente de espín y uno que es definitivamente de espín). El Hamiltoniano nos dice cuál es la energía real para cada posible estado de energía definida. Dada esa lista de posibles energías, podemos preguntarnos si alguna forma particular de dividir la función de onda en subsistemas implica que esos subsistemas interactúen "localmente". De hecho, para una lista aleatoria de energías, no habrá ninguna forma de dividir la función de onda en subsistemas locales, pero para el tipo correcto de Hamiltoniano, habrá exactamente una de esas formas. Exigir que la física parezca local nos dice cómo descomponer nuestro sistema cuántico en una colección de grados de libertad.

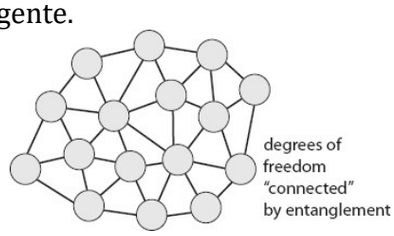
En otras palabras, no necesitamos empezar con un conjunto de bloques fundamentales de la realidad, y luego unirlos para hacer el mundo. Podemos empezar con el mundo, y preguntarnos si hay una manera de pensar en él como una colección de bloques de construcción fundamentales. Con el tipo correcto de Hamiltoniano, lo habrá, y todos nuestros datos y experiencia del mundo sugieren que tenemos el tipo correcto de Hamiltoniano. Es fácil imaginar mundos posibles donde las leyes de la física no eran locales en absoluto. Pero es difícil imaginar cómo sería la vida en un mundo así, o incluso si la vida sería posible; la localización de las interacciones físicas ayuda a poner en orden el universo.

Podemos empezar a ver cómo el espacio mismo emerge de la función de onda. Cuando decimos que hay una forma única de dividir nuestro sistema en grados de libertad que interactúan localmente con sus vecinos, todo lo que queremos decir es que cada grado de libertad interactúa sólo con un pequeño número de otros grados de libertad. Las nociones de "local" y "más cercano" no se imponen desde el principio, sino que surgen del hecho de que estas interacciones son muy especiales. La forma de pensar al respecto no es "los grados de libertad interactúan sólo cuando están cerca", sino más bien "*definimos* dos grados de libertad: "cercano" cuando interactúan directamente entre sí, y "lejano" cuando no lo hacen". Una larga lista de grados de libertad abstractos se ha unido en una red, en la que cada grado de libertad está conectado a un pequeño número de otros. Esta red forma el esqueleto sobre el que se construye el propio espacio.

Es un comienzo, pero queremos hacer aún más. Cuando alguien te pregunta a qué distancia están dos ciudades diferentes, buscan algo un poco más específico que "cerca" o "lejos". Quieren una distancia real, y eso es lo que la métrica del espacio-tiempo normalmente nos permite calcular. En nuestra función de onda abstracta dividida en grados de libertad, aún no hemos construido una geometría completa, sólo una noción de cerca y lejos.

Podemos hacerlo mejor. Recuerden la intuición de los estados de vacío en la teoría cuántica de campos que Jacobson utilizó para derivar la ecuación de Einstein: la entropía de enredo de una región del espacio es proporcional al área de su límite. En nuestro contexto actual de un estado cuántico descrito en términos de grados de libertad abstractos, no sabemos qué se supone que significa "área". Pero sí tenemos un enredo entre los grados de libertad, y para cualquier conjunto de ellos podemos calcular su entropía.

Así que una vez más siguiendo nuestra filosofía de ingeniería inversa, podemos *definir* el "área" de una colección de grados de libertad para que sea proporcional a su entropía de enredo. De hecho, podemos afirmar esto para cada subconjunto posible de grados de libertad, asignando áreas a cada superficie que podamos imaginar dibujar dentro de nuestra red. Felizmente, los matemáticos descubrieron hace mucho tiempo que conocer el área de cada posible superficie en una región es suficiente para determinar completamente la geometría de esa región; es completamente equivalente a conocer la métrica de todas partes. En otras palabras, la combinación de (1) saber cómo se enredan nuestros grados de libertad, y (2) postular que la entropía de cualquier colección de grados de libertad define un área del límite alrededor de esa colección, es suficiente para determinar completamente la geometría de nuestro espacio emergente.



Podemos describir esta construcción en términos equivalentes pero ligeramente menos formales. Elija dos de nuestros grados de libertad espacio-tiempo. Por lo general tendrán algún enredo entre

ellos. Si fueran modos de campos cuánticos vibrantes en el estado de vacío, sabemos exactamente cuál sería ese grado de entrelazamiento: sería alto si estuvieran cerca, y bajo si estuvieran lejos. Ahora simplemente estamos pensando al revés. Si los grados de libertad están muy enredados, *definimos* que están cerca, y cuanto más lejos y más lejos, menos enredados están. Una métrica del espacio ha surgido de la estructura enmarañada del estado cuántico.

Pensar de esta manera es un poco inusual, incluso para los físicos, porque estamos acostumbrados a pensar en partículas que se mueven a través del espacio, mientras que damos por sentado el espacio mismo. Como sabemos por el experimento de pensamiento EPR, dos partículas pueden estar completamente enredadas sin importar lo lejos que estén; no hay una relación necesaria entre el enredo y la distancia. Aquí, sin embargo, no estamos hablando de partículas sino de los grados de libertad fundamentales que conforman el espacio mismo. No están enredadas de ninguna manera antigua; están enlazadas en una estructura muy específica. *

Ahora podemos usar el truco de Jacobson con la entropía y el área. Conocer el área de cada superficie de nuestra red nos da una geometría, y conocer la entropía de cada región nos dice algo sobre la energía de esa región. Yo mismo he estado involucrado en este enfoque, en documentos de 2016 y 2018 con mis colaboradores ChunJun (Charles) Cao y Spyridon Michalakis. Ideas estrechamente relacionadas han sido investigadas por Tom Banks, Willy Fischler, Steve Giddings y otros físicos que están dispuestos a contemplar la idea de que el espacio tiempo no es fundamental, sino que surge de la función de la onda.

No estamos en el punto en el que podamos decir simplemente, "Sí, esta geometría emergente en el espacio evoluciona con el tiempo de la manera correcta para describir un espacio tiempo que obedece a la ecuación de Einstein de la relatividad general". Ese es el objetivo final, pero aún no hemos llegado a ese punto. Lo que podemos hacer es especificar una lista de requisitos bajo los cuales eso es exactamente lo que sucede. Los requisitos individuales parecen razonables - como "a grandes distancias, la física parece una teoría de campo cuántico efectiva" - pero muchos de ellos aún no han sido probados, y hasta ahora los resultados más rigurosos sólo están disponibles en situaciones en las que el campo gravitatorio es relativamente débil. Aún no tenemos una forma de describir los agujeros negros o el Big Bang, aunque hay algunas ideas prometedoras.

Así es la vida como físico teórico. No tenemos todas las respuestas, pero no perdamos de vista la ambición general: partiendo de una función de onda cuántica abstracta, tenemos un mapa de ruta que describe cómo emerge el espacio, con una geometría fijada por el entrelazamiento cuántico, y esa geometría parece obedecer a las reglas dinámicas de la relatividad general. Hay tantas advertencias y suposiciones en esta propuesta que es difícil saber por dónde empezar a enumerarlas. Pero parece haber una perspectiva muy real de que la ruta para entender el universo no está en cuantificar la gravedad, sino en encontrar la gravedad dentro de la mecánica cuántica.

Puede que hayas notado un pequeño desequilibrio en esta discusión. Nos hemos preguntado cómo el espacio-tiempo puede emerger del enredo en la gravedad cuántica. Pero si somos honestos, sólo hemos visto cómo surge el espacio; hemos dado por sentado que el tiempo es algo que viene con el viaje. Y es posible que este enfoque sea completamente justo. Aunque la relatividad trata el espacio y el tiempo como si estuvieran en igualdad de condiciones, la mecánica cuántica generalmente no lo hace. La ecuación de Schrödinger, en particular, los trata de manera muy diferente: literalmente describe cómo el estado cuántico evoluciona con el tiempo. El "espacio" puede o no ser parte de esa ecuación, dependiendo del sistema que estemos viendo, pero el tiempo es fundamental. Es plausible que la simetría entre el espacio y el tiempo con la que estamos familiarizados por la relatividad no esté incorporada en la gravedad cuántica, sino que surja en la aproximación clásica.

Sin embargo, es abrumadoramente tentador preguntarse si el tiempo, como el espacio, podría ser emergente en lugar de fundamental, y si el enredo podría tener algo que ver con ello. La respuesta es sí en ambos casos, aunque los detalles siguen siendo un poco incompletos.

Si tomamos la ecuación de Schrödinger en su valor nominal, el tiempo parece estar ahí de manera fundamental. De hecho, se deduce inmediatamente que el universo dura eternamente tanto hacia el pasado como hacia el futuro, para casi todos los estados cuánticos. Podrías pensar que esto entra en conflicto con el hecho a menudo repetido de que el Big Bang fue el comienzo de nuestro universo, pero en realidad no sabemos si ese hecho a menudo repetido es cierto. Esa es una predicción de la relatividad general clásica, no de la gravedad cuántica. Si la gravedad cuántica opera de acuerdo con alguna versión de la ecuación de Schrödinger, entonces para casi todos los estados cuánticos, el tiempo va desde menos infinito en el pasado hasta más infinito en el futuro. El Big Bang podría ser simplemente una fase de transición, con un universo infinitamente viejo precediéndolo.

Tenemos que decir "casi todos" en estas declaraciones porque hay una laguna jurídica. La ecuación de Schrödinger dice que la tasa de cambio de la función de onda es impulsada por la cantidad de energía que tiene el sistema cuántico. ¿Qué pasa si consideramos los sistemas cuya energía es precisamente cero? Entonces todo lo que la ecuación dice es que el sistema no evoluciona en absoluto; el tiempo ha desaparecido de la historia.

Podrías pensar que es extremadamente inverosímil que el universo tenga exactamente cero energía, pero la relatividad general sugiere que no deberías estar tan seguro. Por supuesto que parece haber cosas que contienen energía alrededor de nosotros - estrellas, planetas, radiación interestelar, materia oscura, energía oscura, y así sucesivamente. Pero cuando se repasan las matemáticas, también hay una contribución a la energía del universo del propio campo gravitatorio, que es generalmente negativa. En un universo cerrado, que se envuelve sobre sí mismo para formar una geometría compacta, como una esfera tridimensional o un toro, en lugar de extenderse hasta el infinito, esa energía gravitatoria anula precisamente la energía positiva de todo lo demás. Un universo cerrado tiene exactamente cero energía, independientemente de lo que haya dentro.

Es una afirmación clásica, pero hay un análogo de mecánica cuántica que fue desarrollado por John Wheeler y Bryce DeWitt. La ecuación de Wheeler-DeWitt simplemente dice que el estado cuántico del universo no evoluciona en absoluto en función del tiempo.

Esto parece una locura, o al menos en flagrante contradicción con nuestra experiencia de observación. El universo ciertamente parece evolucionar. Este rompecabezas ha sido ingeniosamente etiquetado como el *problema del tiempo* en la gravedad cuántica, y es donde la posibilidad del tiempo emergente podría venir al rescate. Si el estado cuántico del universo obedece a la ecuación de Wheeler-DeWitt (que es plausible, pero está lejos de ser cierta), el tiempo tiene que ser emergente en lugar de fundamental.

Una forma que podría funcionar fue sugerida por Don Page y William Wootters en 1983. Imaginen un sistema cuántico que consista en dos partes: un reloj y todo lo demás en el universo. Imaginen que tanto el reloj como el resto del sistema evolucionan en el tiempo como es habitual. Ahora toma instantáneas del estado cuántico a intervalos regulares, quizás una vez por segundo o una vez por tiempo de Planck. En cualquier instantánea en particular, el estado cuántico describe el reloj leyendo un tiempo en particular, y el resto del sistema en cualquier configuración en la que estaba en ese momento. Eso nos da una colección de estados cuánticos instantáneos del sistema.

Lo bueno de los estados cuánticos es que podemos simplemente sumarlos (superponerlos) para hacer un nuevo estado. Así que hagamos un nuevo estado cuántico sumando todas nuestras instantáneas. Este nuevo estado cuántico no evoluciona con el tiempo; simplemente existe, ya que lo construimos a mano. Y no hay una lectura específica del tiempo en el reloj; el subsistema del reloj está en una superposición de todas las veces en las que tomamos instantáneas. No se parece mucho a nuestro mundo.

Pero aquí está la cosa: dentro de esa superposición de todas las instantáneas, el estado del reloj se enreda con el estado del resto del sistema. Si medimos el reloj y vemos que lee algún tiempo en particular, entonces el resto del universo está en el estado en el que nuestro sistema evolutivo original fue atrapado precisamente en ese momento.

$$\begin{aligned}\Psi = &(\text{system @ } t=0, \text{ clock} = 0)\\ &+ (\text{system @ } t=1, \text{ clock} = 1)\\ &+ (\text{system @ } t=2, \text{ clock} = 2)\\ &+ \ldots\end{aligned}$$

En otras palabras, no hay tiempo "realmente" en el estado de superposición, que es completamente estático. Pero el enredo genera una relación entre lo que el reloj lee y lo que el resto del universo está haciendo. Y el estado del resto del universo es precisamente lo que sería si estuviera evolucionando

como lo hizo el estado original a lo largo del tiempo. Hemos reemplazado "tiempo" como noción fundamental con "lo que el reloj lee en esta parte de la superposición cuántica global". De esta manera, el tiempo ha emergido de un estado estático, gracias a la magia del enredo.

El jurado sigue sin saber si la energía del universo es realmente cero, y por lo tanto el tiempo es emergente, o es cualquier otro número, de tal manera que el tiempo es fundamental. En el estado actual de la técnica, tiene sentido mantener nuestras opciones abiertas e investigar ambas posibilidades.

---

* En 2013, Juan Maldacena y Leonard Susskind sugirieron que deberíamos pensar que las partículas enredadas están conectadas por un agujero de gusano microscópico (e imposible de atravesar) en el espacio tiempo. Esto se ha denominado la "conjetura ER=EPR", después de dos famosos trabajos de 1935: uno de Einstein y Nathan Rosen, donde introdujeron el concepto de los agujeros de gusano; y el otro, por supuesto, de Einstein, Rosen y Boris Podolsky, donde discutieron el enredo. Todavía no está claro hasta dónde se puede llegar con esta sugerencia.

14

Más allá del espacio y el tiempo

La holografía, los agujeros negros y los límites de la localidad

Antes de la muerte de Stephen Hawking en 2018, era el científico vivo más famoso del mundo por un cómodo margen. Esa celebridad era totalmente merecida; Hawking no sólo era una figura pública carismática e influyente, y no sólo tenía una historia personal inspiradora, sino que sus contribuciones científicas eran increíblemente significativas por derecho propio.

El mayor logro de Hawking fue mostrar que, una vez que incluimos los efectos de la mecánica cuántica, los agujeros negros "no son tan negros", como le gustaba decir. Los agujeros negros en realidad emiten un flujo constante de partículas hacia el espacio, y esas partículas llevan la energía lejos del agujero negro, causando que se reduzca su tamaño. Esta constatación condujo tanto a profundos conocimientos (los agujeros negros tienen entropía) como a rompecabezas inesperados (¿a dónde va la información cuando los agujeros negros se forman y luego se evaporan?).

El hecho de que los agujeros negros irradien, y las implicaciones de esa sorprendente idea, son la mejor pista que tenemos sobre la naturaleza de la gravedad cuántica. Hawking no construyó primero una teoría completa de la gravedad cuántica y luego la usó para mostrar que los agujeros negros irradian. En su lugar, usó una aproximación razonable, tratando al propio espacio tiempo como algo clásico, con campos cuánticos dinámicos viviendo encima de él. Esperamos que sea una aproximación razonable, de todos modos; pero algunos de los aspectos desconcertantes de la perspicacia de Hawking nos han hecho dudar. Cuarenta y cinco años después del trabajo original de Hawking sobre el tema, tratar de entender la radiación de los agujeros negros sigue siendo uno de los temas más candentes de la física teórica contemporánea.

Aunque esa tarea está lejos de estar completa, una implicación parece clara: el simple cuadro esbozado en el último capítulo, donde el espacio emerge de un conjunto de enredados grados de libertad cercanos, probablemente no es la historia completa. Es una historia muy buena, y podría ser el punto de partida correcto para construir una teoría de la gravedad cuántica. Pero se basa en gran medida en la idea de la localidad, lo que ocurre en un punto del espacio puede tener un efecto inmediato sólo en los puntos de al lado. Los agujeros negros, en la medida en que los entendemos, parecen indicar que la naturaleza es más sutil que eso. En algunas circunstancias el mundo parece una colección de grados de libertad que interactúan con sus vecinos más cercanos, pero cuando la gravedad se hace fuerte, esa simple imagen se rompe. En lugar de estar distribuidos por el espacio, los grados de libertad se comprimen en una superficie, y el "espacio" es meramente una proyección holográfica de la información contenida en él.

La localidad sin duda juega un papel importante en nuestra vida cotidiana, pero parece que la naturaleza fundamental de la realidad no puede ser capturada por un conjunto de cosas que suceden en lugares precisos del espacio. Una vez más, lo que tenemos aquí es un trabajo para el enfoque de muchos mundos de la mecánica cuántica. Otras formulaciones toman el espacio como algo dado y trabajan dentro de él; la filosofía de la función de onda primero de Everet nos permite aceptar que el espacio puede parecer fundamentalmente diferente dependiendo de cómo lo miremos, si es un concepto útil en absoluto. Los físicos todavía están luchando con las implicaciones de esta idea, pero ya nos ha llevado a algunos lugares muy interesantes.

En relatividad general, un agujero negro es una región del espacio tiempo que se curva tan dramáticamente que nada puede escapar de él, ni siquiera la propia luz. El borde del agujero negro, delimitando el interior desde el exterior, es el horizonte *de sucesos*. Según la relatividad clásica, el área del horizonte de sucesos sólo puede crecer, no encogerse; los agujeros negros aumentan de tamaño cuando la materia y la energía caen, pero no pueden perder masa hacia el mundo exterior.

Todo el mundo pensaba que eso era cierto en la naturaleza hasta 1974, cuando Hawking anunció que la mecánica cuántica lo cambia todo. En presencia de campos cuánticos, los agujeros negros irradian naturalmente partículas a su entorno. Esas partículas tienen un espectro de cuerpo negro, así que cada agujero negro tiene una temperatura; los agujeros negros más masivos son más fríos,

mientras que los agujeros negros muy pequeños son increíblemente calientes. La fórmula para la temperatura de la radiación de un agujero negro está grabada en la lápida de Hawking en la Abadía de West-minster.

Las partículas irradiadas por un agujero negro arrastran energía, haciendo que el agujero pierda masa y finalmente se evapore completamente. Aunque sería bueno observar la radiación de Hawking en un telescopio, no sucederá con ninguno de los agujeros negros que conocemos. La temperatura de Hawking de un agujero negro la masa del sol sería de alrededor de 0,00000006 Kelvin. Cualquier señal de este tipo sería inundada por otras fuentes, como la radiación de microondas sobrante del Big Bang, que tiene una temperatura de unos 2,7 Kelvin. Incluso si tal agujero negro nunca creció por la acumulación de materia y radiación, tomará más de ^{1067} años para que se evapore completamente.

Hay una historia estándar que se cuenta para explicar por qué los agujeros negros emiten radiación. Yo la he contado, Hawking la ha contado, todo el mundo la cuenta. Es así: según la teoría de campos cuánticos, el vacío es un guiso burbujeante de partículas que entran y salen de la existencia, típicamente en pares que consisten en una partícula y una antipartícula. Normalmente no nos damos cuenta, pero en las proximidades del horizonte de sucesos de un agujero negro, una de las partículas puede caer dentro del agujero y luego no salir nunca, mientras que la otra escapa al mundo exterior. Desde la perspectiva de alguien que observa desde lejos, la partícula que escapa tiene energía positiva, así que para equilibrar los libros la partícula que cae debe tener energía negativa, y el agujero negro se encoge en masa a medida que absorbe estas partículas de energía negativa.

Dadas nuestras funciones de onda -primera perspectiva Everettiana-, hay una forma más precisa de describir lo que está sucediendo. La historia de las partículas que aparecen y desaparecen es una metáfora colorida que a menudo proporciona una intuición física, y este es definitivamente uno de esos casos. Pero lo que realmente tenemos es una función de onda cuántica de los campos cercanos al agujero negro. Y esa función de onda no es estática, sino que evoluciona en algo más, en este caso un agujero negro más pequeño más algunas partículas que viajan lejos de él en todas las direcciones. No es tan diferente de un átomo cuyos electrones tienen un poco de energía extra, y que por lo tanto bajan a estados de menor energía emitiendo fotones. La diferencia es que el átomo eventualmente alcanza un estado de menor energía posible y permanece allí, mientras que el agujero negro (hasta donde entendemos) simplemente se descompone por completo, explotando en el último segundo en un destello de partículas de alta energía.

La historia de cómo los agujeros negros se irradian y evaporan fue derivada por Hawking usando las técnicas de la teoría de campo cuántico convencional, justo en un espaciotiempo curvo de relatividad general en lugar del contexto habitual de no gravedad de un físico de partículas. No es un resultado genuino de la gravedad cuántica; el propio espacio tiempo se trata de forma clásica, no como parte de la función de onda cuántica. Pero nada de este escenario parece requerir realmente un profundo conocimiento de la gravedad cuántica. Hasta donde los físicos pueden decir, la radiación de Hawking es un fenómeno robusto. Siempre que descubrimos la gravedad cuántica, en otras palabras, debería reproducir el resultado de Hawking.

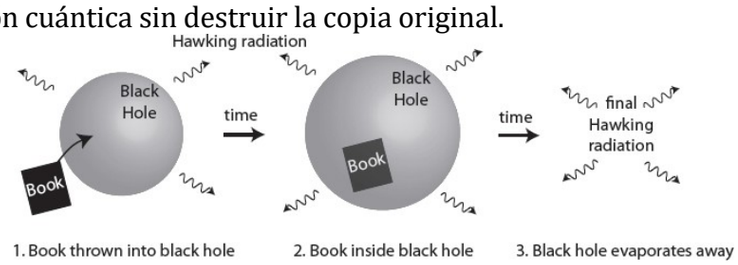
Esto plantea un problema, uno que se ha hecho notorio dentro de la física teórica como el rompecabezas de *información de los agujeros negros*. Recuerden que la mecánica cuántica, en su versión de muchos mundos, es una teoría determinista. La aleatoriedad sólo es aparente, surgiendo de la incertidumbre de auto-ubicación cuando la función de onda se ramifica y no sabemos en qué rama estamos. Pero en el cálculo de Hawking, la radiación de agujeros negros no parece ser determinista; es verdaderamente aleatoria, incluso sin ninguna ramificación. Partiendo de un estado cuántico preciso que describe la materia que colapsa para hacer un agujero negro, no hay forma de calcular el estado cuántico preciso de la radiación en la que se evapora. La información que especifica el estado original parece haberse perdido.

Imagine que toma un libro, tal vez el mismo que está leyendo en este momento, y lo arroja al fuego, dejando que se queme por completo. (No te preocupes, siempre puedes comprar más copias.) Podría parecer que la información contenida en el libro se pierde en las llamas. Pero si ponemos en marcha los poderes de ingenio de nuestro físico, nos damos cuenta de que esta pérdida es sólo aparente. En principio, si capturamos cada pizca de luz y calor y polvo y ceniza del fuego, y tenemos un perfecto conocimiento de las leyes de la física, podríamos reconstruir exactamente lo que entró en el fuego, incluyendo todas las palabras de las páginas del libro. Nunca sucederá en el mundo real, pero la física dice que es concebible.

La mayoría de los físicos piensan que los agujeros negros deberían ser así: tirar un libro, y la información contenida en sus páginas debería estar secretamente codificada en la radiación que el agujero negro emite. Pero esto no es lo que sucede, según la derivación de Hawking de la radiación de los agujeros negros, sino que la información del libro parece estar realmente destruida.

Es posible, por supuesto, que esta implicación sea correcta, que la información sea realmente destruida, y que la evaporación de los agujeros negros no se parezca en nada a un fuego ordinario. No es como si tuviéramos una entrada experimental de una forma u otra. Pero la mayoría de los físicos creen que la información se conserva, y que realmente sale de alguna manera. Y sospechan que el secreto para sacarla está en una mejor comprensión de la gravedad cuántica.

Es más fácil decirlo que hacerlo. Una forma de pensar en por qué los agujeros negros se supone que son negros en primer lugar es que para escapar, tendrías que ser capaz de viajar más rápido que la luz. La radiación de Hawking evita esa dificultad porque en realidad se origina justo fuera del horizonte de sucesos, no en lo profundo del interior. Pero cualquier libro que tiramos dentro se sumerge en el interior, con toda su información intacta. Podrías preguntarte si la información es de alguna manera copiada en la radiación saliente cuando el libro cae a través del horizonte, y llevada a cabo de esa manera. Desafortunadamente eso está en contradicción con los principios básicos de la mecánica cuántica; hay un resultado llamado teorema de *no clonación* que dice que no podemos duplicar la información cuántica sin destruir la copia original.



La otra posibilidad parece ser que el libro caiga hasta el fondo, pero al chocar con la singularidad dentro del agujero negro, su información se transfiere de alguna manera a la radiación saliente en el horizonte. Desafortunadamente, eso parece requerir una comunicación más rápida que la luz. O, de forma equivalente, las no-localidades dinámicas que ocurren en un punto del espacio tiempo influyen inmediatamente en lo que ocurre a cierta distancia. Este tipo de no-localidad es precisamente lo que no puede ocurrir, según las reglas ordinarias de la teoría cuántica de campos. Esta es una pista de que esas reglas podrían tener que ser revisadas dramáticamente una vez que la gravedad cuántica se vuelva importante. *

La propuesta de Hawking de que los agujeros negros irradien no salió de la nada. Vino en respuesta a una sugerencia de Jacob Bekenstein -quien en ese momento era otro estudiante graduado de John Wheeler en Princeton- de que los agujeros negros deberían tener entropía.

Una de las motivaciones detrás de la idea de Bekenstein fue el hecho de que, según la relatividad general clásica, el área del horizonte de sucesos de un agujero negro nunca puede disminuir. Eso suena sospechosamente como la segunda ley de la termodinámica, según la cual la entropía de un sistema cerrado nunca puede disminuir. Inspirados por esta similitud, los físicos construyeron una elaborada analogía entre las leyes de la termodinámica y el comportamiento de los agujeros negros, según la cual la masa del agujero negro es como la energía de un sistema termodinámico, y el área del horizonte de sucesos es como la entropía.

Bekenstein sugirió que era más que una analogía. El área del horizonte de sucesos no es *como* la entropía, *es* la entropía del agujero negro, o al menos es proporcional a ella. Hawking y otros se burlaron de la sugerencia al principio: si los agujeros negros tienen entropía como los sistemas termodinámicos convencionales, también deberían tener una temperatura, ¡y luego deberían emitir radiación! Motivado para refutar esta ridícula noción, Hawking terminó mostrando que todo era cierto. Hoy en día nos referimos a la entropía de un agujero negro como la *entropía de Bekenstein-Hawking*.

Una razón por la que este es un resultado tan provocativo es que clásicamente, los agujeros negros no parecen cosas que deberían tener entropía en absoluto. Son sólo regiones de espacio vacío. Obtienes entropía cuando tu sistema está hecho de átomos u otros componentes diminutos, que pueden ser dispuestos de muchas maneras diferentes manteniendo la misma apariencia macroscópica. ¿Qué se supone que son estos constituyentes para un agujero negro? La respuesta tiene que venir de la mecánica cuántica.

Es natural presumir que la entropía Bekenstein-Hawking de un agujero negro es una especie de entropía enmarañada. Hay algunos grados de libertad dentro del agujero negro, y están enredados con el mundo exterior. ¿Qué son?

Podríamos suponer que los grados de libertad son simplemente modos de vibración de los campos cuánticos dentro del agujero negro. Hay un par de problemas con eso. Por un lado, la verdadera respuesta a la entropía de una región en la teoría de los campos cuánticos era el "infinito". Podríamos reducirlo a un número finito eligiendo ignorar los modos de muy pequeñas longitudes de onda, pero eso implicaba introducir un corte arbitrario en las energías de las vibraciones del campo que estábamos considerando. La entropía de Bekenstein-Hawking, por otro lado, es sólo un número finito, punto. Por otra parte, la entropía de enredo en la teoría del campo debería depender exactamente de cuántos campos están involucrados - electrones, quarks, neutrinos, y así sucesivamente. La fórmula para la entropía de los agujeros negros que Hawking derivó no hace mención alguna de tales cosas.

Si no podemos simplemente atribuir la entropía de los agujeros negros a los campos cuánticos del interior, la alternativa es imaginar que el propio espacio tiempo está hecho de algunos grados cuánticos de libertad, y la fórmula de Bekenstein-Hawking mide el entrelazamiento de los grados de libertad del interior del agujero negro con los grados de libertad del exterior. Si eso suena bastante vago, es porque lo es. No estamos precisamente seguros de cuáles son estos grados de libertad espacio-temporales, o cómo interactúan entre sí. Pero los principios generales de la mecánica cuántica deben seguir siendo respetados. Si hay entropía, y esa entropía proviene del enredo, debe haber grados de libertad que puedan enredarse con el resto del mundo de muchas maneras diferentes, incluso si los agujeros negros clásicos no tienen ninguna característica.

Si esta historia es correcta, el número de grados de libertad en un agujero negro no es infinito, pero es muy grande. Nuestra galaxia de la Vía Láctea contiene un agujero negro supermasivo en su centro, asociado con una fuente de radio llamada Sagitario A*. Observando cómo orbitan las estrellas alrededor del agujero, podemos medir su masa hasta 4 millones de veces la masa del sol. Eso corresponde a una entropía de 1090, que es mayor que la entropía de todas las partículas conocidas en todo el universo observable. El número de grados de libertad en un sistema cuántico tiene que ser al menos tan grande como su entropía, ya que esa entropía proviene precisamente de esos grados de libertad que se enredan con el mundo exterior. Así que debe haber al menos 1090 grados de libertad en el agujero negro.

Mientras que tendemos a prestar atención a las cosas que vemos en el universo -materia, radiación, etc.- casi todos los grados cuánticos de libertad del universo son invisibles, sin hacer nada más que coser el espacio-tiempo. En un volumen de espacio del tamaño aproximado de un humano adulto, debe haber al menos 1070 grados de libertad; lo sabemos porque esa es la entropía de un agujero negro que llenaría tal volumen. Pero sólo hay alrededor de 10^{28} partículas en una persona. Podemos pensar en una partícula como un grado de libertad que ha sido "encendido", mientras que todos los demás grados de libertad están pacíficamente "apagados" en el estado de vacío. En lo que respecta a la teoría de campo cuántico, un ser humano o el centro de una estrella no es tan diferente del espacio vacío.

Tal vez el hecho de que la entropía de un agujero negro sea proporcional a su área es justo lo que deberíamos esperar. En la teoría de los campos cuánticos es natural que las regiones del espacio tengan una entropía proporcional a su área límite, y un agujero negro es sólo una región del espacio. Pero un problema acecha bajo la superficie. Es natural que una región del espacio *en el estado de vacío tenga una entropía proporcional* a su área límite. Pero un agujero negro no es parte del estado de vacío; hay un agujero negro allí, y el espacio tiempo está notablemente curvado.

Los agujeros negros tienen una propiedad muy especial: representan los *estados de mayor entropía* que podemos tener en una región del espacio de cualquier tamaño. Este hecho provocativo fue notado por primera vez por Bekenstein, y luego refinado por Raphael Bousso. Si se parte de una región dentro del estado de vacío y se intenta aumentar su entropía, también se debe aumentar su energía. (Ya que comenzaste en el vacío, no hay ningún lugar donde la energía pueda ir más que hacia arriba.) A medida que sigues lanzando entropía, la energía también aumenta. Eventualmente tienes tanta energía en una región fija que todo el asunto no puede evitar colapsar en un agujero negro. Ese es el límite; no puedes meter más entropía en una región de la que tendrías si hubiera un agujero negro.

Esa conclusión es profundamente diferente de lo que esperaríamos en una teoría de campo cuántico ordinaria sin gravedad. Allí, no hay límite en cuanto a la cantidad de entropía que podemos encajar en una región, porque tampoco hay límite en cuanto a la cantidad de energía que puede haber.

Esto refleja el hecho de que hay un número infinito de grados de libertad en la teoría de campos cuánticos, incluso en una región de tamaño finito.

La gravedad parece ser diferente. Hay una cantidad máxima de energía y entropía que puede caber en una región determinada, lo que parece implicar que sólo hay un número finito de grados de libertad allí. De alguna manera estos grados de libertad se enredan en la forma correcta de unirse en la geometría del espacio tiempo. No son sólo los agujeros negros: cada región del espacio tiempo tiene una entropía máxima que podríamos imaginar que encaja en ella (la entropía que tendría un agujero negro de ese tamaño), y por lo tanto un número finito de grados de libertad. Incluso es cierto para el universo como un todo; porque hay energía del vacío, la aceleración del espacio se expande, y eso significa que hay un horizonte a nuestro alrededor que delinea la extensión de la parte observable de nuestro cosmos. Esa parte observable del espacio tiene una entropía máxima finita, por lo que sólo hay un número finito de grados de libertad necesarios para describir todo lo que vemos o veremos.

Si esta historia va por el buen camino, tiene una consecuencia inmediata y profunda para la imagen de la mecánica cuántica de muchos mundos. Un número finito de grados cuánticos de libertad implica un espacio Hilbert de dimensiones finitas para el sistema en su conjunto (en este caso, cualquier región elegida del espacio). Esto a su vez implica que hay un número finito de ramas de la función de onda, no un número infinito. Por eso Alice se mostró cautelosa en el capítulo ocho sobre si hay un número infinito de "mundos" en la función de onda. En muchos modelos simples de mecánica cuántica, incluyendo el de un conjunto fijo de partículas que se mueven suavemente a través del espacio o cualquier teoría ordinaria de campo cuántico, el espacio de Hilbert es de dimensiones infinitas y podría haber potencialmente un número infinito de mundos. Pero la gravedad parece cambiar las cosas de una manera importante. Impide que la mayoría de esos mundos existan, porque describirían demasiada energía siendo empaquetada en una región local.

Así que tal vez en el universo real, donde la gravedad ciertamente existe, la mecánica cuántica de Everet sólo describe un número finito de mundos. El número que Alice mencionó para la dimensionalidad del espacio de Hilbert fue $2^{10^{122}}$.

Ahora podemos revelar de dónde vino ese número: es a partir de calcular la entropía que nuestro universo observable tendrá una vez que alcance la máxima entropía, y trabajar hacia atrás para averiguar cuán grande debe ser el espacio de Hilbert para acomodar tanta entropía. (El tamaño del universo observable está fijado por la energía del vacío, por lo que el exponente 10^{122} es la relación de la escala de Planck con la constante cosmológica, familiar de nuestra discusión en el capítulo doce). Nuestra confianza en los principios básicos de la gravedad cuántica no es lo suficientemente fuerte como para estar absolutamente seguros de que sólo hay un número finito de mundos Everettianos, pero parece razonable, y ciertamente haría las cosas mucho más simples.

La naturaleza de la entropía máxima de los agujeros negros también tiene una importante consecuencia para la gravedad cuántica. En la relatividad general clásica, no hay nada especial en la región interior de un agujero negro, entre el horizonte de sucesos y la singularidad. Hay un campo gravitatorio allí, pero para un observador que se infiltra, por lo demás parece un espacio vacío. Según la historia que contamos en el último capítulo, la versión cuántica del "espacio vacío" es algo así como "una colección de grados de libertad espacio-tiempo enredados de tal manera que forman una geometría tridimensional emergente". Implícito en esa descripción es que los grados de libertad están dispersos más o menos uniformemente en todo el volumen del espacio que estamos viendo. Y si eso fuera cierto, el estado de entropía máxima de esa forma tendría todos esos grados de libertad enredados con el mundo exterior. La entropía sería por lo tanto proporcional al volumen de la región, no al área de su límite. ¿Qué es lo que pasa?

Hay una pista del rompecabezas de información del agujero negro. El problema era que no hay una forma obvia de transmitir la información de un libro que ha caído en el agujero negro a la radiación Hawking emitida desde el horizonte de sucesos, al menos no sin que las señales se muevan más rápido que la luz. Así que qué hay de esta idea loca: quizás toda la información sobre el estado del agujero negro, tanto del "interior" como del horizonte, se puede pensar que vive en el propio horizonte, no enterrada en el interior. El estado del agujero negro "vive", en cierto sentido, en una superficie bidimensional, en lugar de ser estirado a través de un volumen tridimensional.

Desarrollado por primera vez por Gerard 't Hooft y Leonard Susskind en la década de 1990, basado en parte en un trabajo de Charles Thorn de 1978, esta idea se conoce como el *principio holográfico*. En un holograma ordinario, la luz brillante sobre una superficie bidimensional revela una imagen aparentemente tridimensional. Según el principio holográfico, el interior aparentemente

tridimensional de un agujero negro refleja la información codificada en la superficie bidimensional de su horizonte de sucesos. Si esto es cierto, tal vez no sea tan difícil obtener información del agujero negro a su radiación saliente, porque la información siempre estuvo en el horizonte para empezar.

Los físicos aún no han establecido el significado preciso de la holografía para los agujeros negros del mundo real. ¿Es sólo una forma de contar el número de grados de libertad, o deberíamos pensar que hay una teoría bidimensional real que vive en el horizonte de sucesos y que describe la física del agujero negro? No lo sabemos, pero hay un contexto diferente en el que la holografía es muy precisa: la llamada correspondencia *AdS/CFT*, propuesta por Juan Maldacena en 1997. El "AdS" en la etiqueta significa "espacio anti-de Sitter", un hipotético espacio-tiempo sin otras fuentes de materia que la energía negativa del vacío (en contraposición a la energía positiva del vacío de nuestro mundo real). "CFT" significa teoría de *campo conformal*, un tipo particular de teoría de campo cuántico que puede definirse en un límite infinitamente lejano de AdS. Según Maldacena, estas dos teorías son secretamente equivalentes entre sí. Eso es extremadamente provocativo, por un par de razones. Primero, la teoría de AdS incluye la gravedad, mientras que la CFT es una teoría de campo ordinaria que no tiene ninguna gravedad. Segundo, el límite de un espacio tiempo tiene una dimensión menos que el propio espacio tiempo. Si consideramos el AdS cuatridimensional, por ejemplo, eso equivale a una teoría de campo conformado tridimensional. No se podría pedir un ejemplo más explícito de holografía en acción.

Entrar en los detalles de AdS/CFT requeriría otro libro completamente. Pero vale la pena mencionar que es en este contexto que se está llevando a cabo la mayoría de las investigaciones modernas sobre la conexión entre la geometría del espacio tiempo y el entrelazamiento cuántico. Como señalaron Shinsei Ryu, Tadashi Takayanagi, Mark Van Raamsdonk, Brian Swingle y otros a principios de la década de 2000, existe una conexión directa entre el entrelazamiento en el límite del CFT y la geometría resultante en el interior del AdS. Debido a que AdS/CFT está relativamente bien definido como modelos de la gravedad cuántica, la comprensión de esta conexión ha sido el objetivo de un esfuerzo muy intenso en los últimos años.

Desgraciadamente, no es el mundo real. Toda la diversión de AdS/CFT viene de relacionar las cosas en el interior, donde la gravedad ocurre, con las cosas en el límite, donde la gravedad está ausente. Pero la existencia del límite es muy especial para el espacio anti-de Sitter, que depende de una energía negativa de vacío. Nuestro universo parece tener una energía de vacío positiva, no una negativa.

Hay un viejo chiste sobre el borracho que busca bajo una farola sus llaves perdidas. Cuando alguien le pregunta si está seguro de haberlas perdido allí, responde: "Oh no, las perdí en otro lugar, pero la luz es mucho mejor aquí". En el juego de la gravedad cuántica, AdS/CFT es la farola más brillante del mundo. Al estudiarla hemos descubierto un gran número de conceptos fascinantes que son útiles para los físicos teóricos, pero no hay una ruta directa para usar ese conocimiento para entender por qué las manzanas caen de los árboles, u otros aspectos de la gravedad en el espacio que nos rodea. Vale la pena continuar la búsqueda, pero es importante mantener los ojos en el premio: entender el mundo en el que realmente vivimos.

Las implicaciones de la holografía para los agujeros negros del mundo real son menos claras que para el mundo imaginario de AdS/CFT. ¿Estamos diciendo que la relatividad general clásica estaba completamente equivocada acerca de que el interior de un agujero negro pareciera vacío, y que de hecho un observador infalible se golpearía contra una superficie holográfica al encontrarse con el horizonte de sucesos? No estamos... al menos, la mayoría de los adherentes de la holografía no están diciendo eso. Más bien, apelan a una idea relacionada e igualmente sorprendente, *la complementariedad de los agujeros negros*. Fue propuesta por Susskind y otros, usando una terminología que recuerda intencionalmente la filosofía de Bohr de la medición cuántica.

La versión de la complementariedad de los agujeros negros dice que las cosas son un poco más matizadas que simplemente "el interior de un agujero negro parece un espacio vacío ordinario" o "toda la información sobre el agujero negro está codificada en el horizonte de sucesos". De hecho, ambas son verdaderas, pero no podemos hablar ambos idiomas al mismo tiempo. O, como es más probable que digan los físicos, no parecen ser verdaderos simultáneamente para un solo observador. Para un

observador que cae a través del horizonte de sucesos, todo parece un espacio vacío normal, mientras que para un observador que mira el agujero desde lejos, toda la información se extiende a través del horizonte.

Aunque este comportamiento es fundamentalmente cuántico-mecánico, tiene un precursor clásico. Piensa en lo que le sucede a un libro (o a una estrella, o lo que sea) cuando lo tiramos a un agujero negro en la relatividad general clásica. Desde el punto de vista del libro, pasa directamente al interior. Pero el efecto de la deformación del espacio tiempo es fuerte cerca del horizonte de sucesos, así que eso no es lo que vería un observador externo. Verían que el libro parece ralentizarse al acercarse al horizonte, volviéndose más rojo y más oscuro en el camino. Nunca lo verían cruzar; para alguien que esté lejos, los objetos parecen congelarse en el tiempo al acercarse al horizonte, en lugar de hundirse. Esto llevó a los astrofísicos a desarrollar una imagen llamada el *paradigma de la membrana*, según el cual podemos modelar las propiedades físicas de un agujero negro imaginando que hay una membrana física en el horizonte, con ciertas propiedades calculables como la temperatura y la conductividad eléctrica. El paradigma de la membrana se pensó originalmente como un atajo conveniente a través del cual los astrofísicos podrían simplificar los cálculos que implican los agujeros negros, pero la complementariedad afirma que los observadores externos realmente ven los agujeros negros como si fueran membranas cuánticas vibrantes donde estaría el clásico horizonte de sucesos.

Si se tiende a pensar en el espacio-tiempo como algo fundamental, esto podría no tener ningún sentido. El espacio tiempo tiene algo de geometría, no hay nada más. Pero desde el punto de vista cuántico-mecánico es perfectamente plausible; hay una función de onda del universo, y diferentes observaciones pueden revelar diferentes cosas sobre él. No es muy diferente de decir que el número de partículas en un estado depende de cómo lo observamos.

El mundo es un estado cuántico que evoluciona en el espacio de Hilbert, y el espacio físico emerge de él. No debería sorprender que un solo estado cuántico pueda exhibir diferentes nociones de posición y localidad dependiendo del tipo de observaciones que hagamos de él. Según la complementariedad de los agujeros negros, no existe tal cosa como "cuál es la geometría del espacio tiempo" o "dónde están los grados de libertad"; uno se pregunta qué es el estado cuántico o qué ve algún observador en particular.

Esto suena diferente a la imagen que exploramos en el último capítulo, donde los grados de libertad se distribuyeron en una red que llenaba el espacio, y se enredaron para definir una geometría emergente. Pero esa imagen sólo se aplicaba cuando la gravedad era débil, y los agujeros negros definitivamente no se califican como débiles. En la visión presentada en este capítulo, todavía hay grados de libertad abstractos que se juntan para formar el espacio tiempo, pero "dónde están situados" depende de cómo se observan. El espacio en sí mismo no es fundamental; es sólo una forma útil de hablar desde ciertos puntos de vista.

Esperemos que estos últimos capítulos hayan transmitido con éxito la forma en que la mecánica cuántica de Muchos Mundos podría tener importantes implicaciones para el antiguo problema de la gravedad cuántica. Para ser honesto, muchos físicos que trabajan en estos problemas no piensan en sí mismos como si estuvieran usando Muchos Mundos, aunque implícitamente lo están haciendo. Ciertamente no están usando variables ocultas, o colapsos dinámicos, o un enfoque epistémico de la mecánica cuántica. Cuando se trata de entender cómo cuantificar el propio universo, Muchos Mundos parece ser el camino más directo a seguir, si no otra cosa.

¿Está la imagen que hemos esbozado, donde el entrelazamiento entre grados de libertad de alguna manera se une para definir la geometría de nuestro aproximadamente clásico espacio tiempo, realmente en el camino correcto? Nadie lo sabe con seguridad. Lo que parece claro, dado el estado actual de nuestro conocimiento, es que tanto el espacio como el tiempo podrían emerger de un estado cuántico abstracto de la manera deseada... todos los ingredientes están ahí, y no está fuera de lugar esperar que unos pocos años más de trabajo traigan una imagen mucho más nítida. Si nos entrenamos para descartar nuestros prejuicios clásicos, y tomamos las lecciones de la mecánica cuántica al pie de la letra, podemos eventualmente aprender a extraer nuestro universo de la función de onda.

---

* No está completamente de acuerdo en que los objetos que se infiltran realmente viajan al interior de un agujero negro. En 2012 un grupo de físicos sostuvo que, si la información va a escapar de los agujeros negros que se evaporan sin violar los principios básicos de la mecánica cuántica, algo dramático tiene que suceder en el horizonte de sucesos: no un tranquilo y vacío espacio-

tiempo, como se suele suponer, sino una ráfaga de partículas de alta energía conocida como cortafuegos. Las opiniones sobre la propuesta del cortafuegos están divididas, ya que los teóricos siguen discutiendo de un lado a otro sobre el tema.

EPÍLOGO

Todo es cuántico

¿Qué habría pensado Einstein de la teoría cuántica de muchos mundos? Probablemente habría sido rechazado, al menos en la primera exposición. Pero tendría que admitir que hay aspectos de la idea que encajan muy bien con su imagen de cómo debería funcionar la naturaleza.

Einstein murió en Princeton en 1955, justo cuando Everett estaba discutiendo su idea. Estaba firmemente comprometido con el principio de la localidad, y le molestaba enormemente la espeluznante acción a distancia que implicaba el entrelazamiento cuántico. En ese sentido, podría muy bien haber estado horrorizado por muchos mundos y el principio holográfico, ideas que tratan el espacio mismo como emergente en lugar de fundamental. La sugerencia de que la realidad se describe como un vector en un enorme espacio de Hilbert, en lugar de como materia y energía en el viejo espacio tiempo cuatridimensional, no es algo que le hubiera gustado. Pero es muy probable que le hubiera gustado que Everett volviera a describir el universo de la mejor manera posible, con una evolución definida y determinante, y que reafirmara el principio de que la realidad es, en última instancia, conocible.

A finales de la vida, Einstein relató una historia de su infancia.

> Una maravilla de este tipo la experimenté cuando era niño de cuatro o cinco años cuando mi padre me mostró una brújula. El hecho de que esta aguja se comportara de manera tan determinada no encajaba en absoluto en el tipo de ocurrencias que podían encontrar un lugar en el mundo inconsciente de los conceptos (eficacia producida por el "tacto" directo). Todavía puedo recordar, o al menos creer que puedo recordar, que esta experiencia me causó una profunda y duradera impresión.
>
> Algo profundamente escondido tenía que estar detrás de las cosas.

Me parece que este impulso está en el corazón de todas las preocupaciones de Einstein sobre la mecánica cuántica. Puede que se preocupara mucho por el indeterminismo y la no localidad, pero lo que realmente le molestaba era su sensación de que la mecánica cuántica de Copenhague sustituía el rigor de las buenas teorías científicas por un paradigma difuso en el que una noción mal definida de "medición" desempeñaba un papel central. Siempre estaba buscando lo profundamente oculto bajo la superficie, el principio que devolvería la inteligibilidad a lo que se había convertido en un misterio. Poco sospechaba que lo que estaba oculto podría ser otras ramas de la función de la onda.

No importa realmente lo que Einstein hubiera pensado, por supuesto; las teorías científicas suben o bajan por sus méritos, no porque podamos conjurar hipotéticos fantasmas de grandes mentes del pasado para asentir con su aprobación.

Pero es útil prestar atención a esas grandes mentes, aunque sólo sea para recordar las conexiones entre los debates del pasado y las investigaciones del presente. Los temas tratados en este libro provienen directamente de las discusiones entre Einstein y Bohr y otros en la década de 1920. Tras la Conferencia de Solvay, la opinión popular dentro de la comunidad de la física se inclinó por el camino de Bohr, y el enfoque de Copenhague sobre la mecánica cuántica se estableció como un dogma arraigado. Se ha demostrado que es una herramienta sorprendentemente exitosa para hacer predicciones para experimentos y diseñar nuevas tecnologías. Pero como teoría fundamental del mundo, se queda lamentablemente corta.

He expuesto el caso de por qué Múltiples Mundos es la formulación más prometedora de la mecánica cuántica. Pero tengo un enorme respeto y tengo frecuentes conversaciones productivas con los partidarios de otros enfoques. Lo que me pone melancólico son los físicos profesionales que descartan el trabajo fundacional y no creen que los temas merezcan ser tomados en serio. Después de leer este libro, se describa o no como un Everettiano, espero que esté convencido de la importancia de acertar con la mecánica cuántica de una vez por todas.

Soy optimista sobre cómo están progresando las cosas. El estudio moderno de los fundamentos cuánticos no es sólo un grupo de físicos ancianos charlando sobre ideas fantásticas en vasos de whisky después de que el trabajo real se hace por el día. Gran parte del reciente progreso en el desarrollo de nuestra comprensión de la teoría cuántica ha sido estimulado, directa o indirectamente, por innovaciones tecnológicas: computación cuántica, criptografía cuántica, e información cuántica en general. Hemos llegado a un punto en el que ya no es práctico trazar una línea brillante entre los reinos cuántico y clásico. Todo es cuántico. Este estado de cosas ha obligado a los físicos a tomar los

fundamentos de la mecánica cuántica un poco más en serio, y ha llevado a nuevos conocimientos que podrían ayudar a explicar la aparición del espacio y el tiempo en sí mismos.

Creo que haremos un progreso significativo en estos difíciles rompecabezas en un futuro próximo. Y me gusta creer que la mayoría de las otras versiones de mí en otras ramas de la función de la onda se sienten de la misma manera.

APÉNDICE

La historia de las partículas virtuales

Nuestra discusión de la teoría de campos cuánticos en el capítulo 12 parecería divertidamente idiosincrásica para la mayoría de los teóricos de campos cuánticos en activo. Lo que nos preocupaba era sólo el estado de vacío, la configuración de menor energía de un conjunto de campos cuánticos que llenan el espacio. Pero eso es sólo un estado de un número infinito. Lo que a la mayoría de los físicos les importa son todos los demás estados, los que parecen partículas que se mueven e interactúan entre sí.

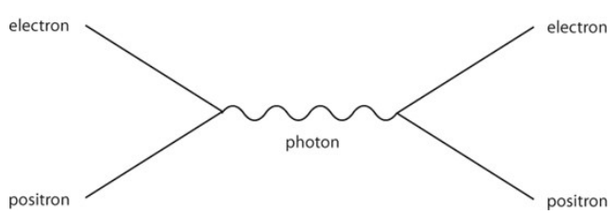
Así como es natural hablar de "la posición del electrón" cuando realmente conocemos mejor y deberíamos hablar de la función de onda del electrón, los físicos que entienden perfectamente bien que el mundo está hecho de campos tienden a hablar de partículas todo el tiempo. Incluso se llaman a sí mismos "físicos de partículas" sin vergüenza perceptible. Es un impulso comprensible: las partículas son lo que vemos, independientemente de lo que ocurre bajo la superficie.

La buena noticia es que está bien, siempre y cuando sepamos lo que estamos haciendo. Para muchos propósitos, podemos hablar *como si* lo que realmente existe es una colección de partículas viajando a través del espacio, chocando unas con otras, siendo creadas y destruidas, y ocasionalmente entrando o saliendo de la existencia. El comportamiento de los campos cuánticos puede, bajo las circunstancias adecuadas, ser modelado con precisión como la interacción repetida de muchas partículas. Esto podría parecer natural cuando el estado cuántico describe un número fijo de vibraciones de campo similares a las de las partículas, lejos unas de otras y felizmente inconscientes de la existencia de las otras. Pero si seguimos las reglas, podemos calcular lo que sucede usando el lenguaje de las partículas, incluso cuando un montón de campos están vibrando justo encima de otro, exactamente cuando se podría esperar que su campo sea el más importante.

Esa es la visión esencial de Richard Feynman y su conocida herramienta de diagramas de *Feynman*. Cuando inventó por primera vez sus diagramas, Feynman tenía la esperanza de que estaba sugiriendo una alternativa basada en las partículas a la teoría cuántica de campos, pero no fue así. Lo que son es un maravilloso y vívido dispositivo metafórico y un método de cálculo increíblemente conveniente, dentro del paradigma general de la teoría de campos cuánticos.

Un diagrama de Feynman es simplemente un dibujo animado de figuras de palo que representan partículas que se mueven e interactúan entre sí. Con el tiempo corriendo de izquierda a derecha, un conjunto inicial de partículas entra, se mezclan con varias partículas que aparecen o desaparecen, entonces un conjunto final de partículas emerge. Los físicos utilizan estos diagramas no sólo para describir los procesos que se permite que sucedan, sino para calcular con precisión la probabilidad de que realmente lo hagan. Si se quiere preguntar, por ejemplo, en qué partículas podría decaer un bosón de Higgs y con qué rapidez, se haría un cálculo que implicaría un montón de diagramas de Feynman, cada uno de los cuales representa una cierta contribución a la respuesta final. Del mismo modo, si quieres saber qué tan probable es que un electrón y un positrón se dispersen el uno al otro.

Aquí hay un simple diagrama de Feynman. La forma de pensar en esta imagen es que un electrón y un positrón (líneas rectas) entran por la izquierda, se encuentran y se aniquilan en un fotón (línea ondulante), que viaja durante un tiempo antes de convertirse de nuevo en un par electrón/positrón. Hay reglas específicas que permiten a los físicos asignar números precisos a cada uno de esos diagramas, indicando la contribución que esta imagen hace al proceso global de "un electrón y un positrón se dispersan el uno al otro".



La historia que contamos basada en los diagramas de Feynman es sólo eso, una historia. No es literalmente cierto que un electrón y un positrón se transformen en un fotón y luego vuelvan a transformarse. Para empezar, los fotones reales se mueven a la velocidad de la luz, mientras que los

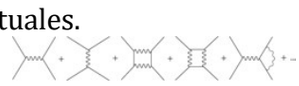
pares de electrones y positrones (ya sea las partículas individuales o el centro de masa de un par de ellas) no lo hacen.

Lo que sucede en realidad es que tanto el campo de electrones como el de positrones interactúan constantemente con el campo electromagnético; las oscilaciones en cualquier campo cargado eléctricamente, como el de electrones o positrones, van acompañadas necesariamente de sutiles oscilaciones en el campo electromagnético también. Cuando las oscilaciones en dos de estos campos (que interpretamos como el electrón y el positrón) se acercan entre sí o se superponen, todos los campos se empujan y tiran el uno del otro, haciendo que nuestras partículas originales se dispersen en alguna dirección. La idea de Feynman es que podemos calcular lo que sucede en la teoría de campo pretendiendo que hay un montón de partículas volando en ciertas formas.

Esto representa una enorme conveniencia computacional; los físicos de partículas en funcionamiento utilizan los diagramas de Feynman todo el tiempo, y ocasionalmente sueñan con ellos mientras duermen. Pero hay ciertos compromisos conceptuales que deben hacerse a lo largo del camino. Las partículas confinadas al interior de los diagramas de Feynman, que no entran por la izquierda ni salen por la derecha, no obedecen las reglas habituales de las . No tienen, por ejemplo, la misma energía o masa que una partícula regular. Obedecen su propio conjunto de reglas, pero no las habituales.

Eso no debería sorprender, ya que las "partículas" dentro de los diagramas de Feynman no son partículas en absoluto; son un conveniente cuento de hadas matemático. Para recordarnos eso, las etiquetamos como partículas "virtuales". Las partículas virtuales son sólo una forma de calcular el comportamiento de los campos cuánticos, pretendiendo que las partículas ordinarias se convierten en partículas extrañas con energías imposibles, y lanzando tales partículas de un lado a otro entre ellas. Un fotón real tiene exactamente masa cero, pero la masa de un fotón virtual puede ser absolutamente cualquier cosa. Lo que queremos decir con "partículas virtuales" son sutiles distorsiones en la función de onda de una colección de campos cuánticos. A veces se denominan "fluctuaciones" o simplemente "modos" (refiriéndose a una vibración en un campo con una longitud de onda particular). Pero todo el mundo las llama partículas, y pueden ser representadas con éxito como líneas dentro de los diagramas de Feynman, así que podemos llamarlas así.

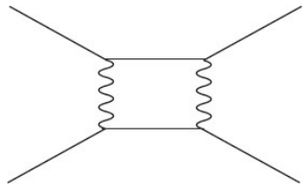
El diagrama que dibujamos para un electrón y un positrón dispersándose el uno al otro no es el único que podríamos dibujar; de hecho, es sólo uno de un número infinito. Las reglas del juego nos dicen que debemos resumir todos los posibles diagramas con las mismas partículas entrantes y salientes. Podemos enumerar tales diagramas en orden de complejidad creciente, con diagramas posteriores que contienen más y más partículas virtuales.



El número final que obtenemos es una amplitud, así que lo cuadramos para obtener la probabilidad de que tal proceso ocurra. Usando los diagramas de Feynman, podemos calcular la probabilidad de que dos partículas se dispersen entre sí, de que una partícula decaiga en varias, o de que las partículas se conviertan en otro tipo de partículas.

Aparece una preocupación obvia: Si hay un número infinito de diagramas, ¿cómo puedes sumarlos todos y obtener un resultado sensato? La respuesta es que los diagramas aportan cantidades cada vez más pequeñas a medida que se complican. Aunque hay un número infinito de ellos, la suma total de todos los muy complicados puede ser un número diminuto. En la práctica, de hecho, a menudo obtenemos respuestas bastante precisas calculando sólo los primeros diagramas de la serie infinita.

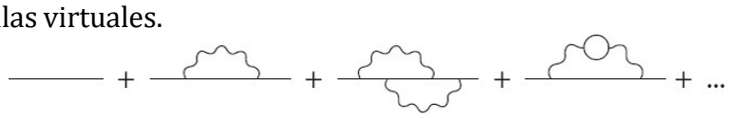
Sin embargo, hay una sutileza en el camino hacia este buen resultado. Considere un diagrama que tiene un bucle en él, es decir, donde podemos trazar alrededor de algún conjunto de líneas de partículas para formar un círculo cerrado. Aquí hay un electrón y un positrón intercambiando dos fotones:



Cada línea representa una partícula con una cierta cantidad de energía. Esta energía se conserva cuando las líneas se unen: si una partícula entra y se divide en dos, por ejemplo, la suma de las energías de esas dos partículas debe ser igual a la de la partícula inicial. Pero cómo se divide esa energía es completamente arbitrario, siempre y cuando la suma total sea fija. De hecho, debido a la loca lógica de las partículas virtuales, la energía de una partícula puede ser incluso un número negativo, de tal manera que la otra tiene más energía que la de la partícula inicial.

Esto significa que cuando calculamos el proceso descrito por un diagrama de Feynman con un bucle cerrado interno, una cantidad arbitrariamente grande de energía puede estar viajando por cualquier línea particular dentro del bucle. Tristemente, cuando hacemos el cálculo de lo que tales diagramas contribuyen a la respuesta final, el resultado puede resultar ser infinitamente grande. Ese es el origen de los infames infinitos que plagan la teoría cuántica de campos. Obviamente la probabilidad de una cierta interacción puede ser como mucho de 1, así que una respuesta infinita significa que de alguna manera nos hemos equivocado.

Feynman y otros lograron elaborar un procedimiento para tratar con estos infinitos, ahora conocido como *renormalización*. Cuando tienes un montón de campos cuánticos que interactúan entre sí, no puedes simplemente tratarlos primero por separado, y luego añadir las interacciones al final. Los campos están constantemente, inevitablemente, afectándose unos a otros. Incluso cuando tenemos una pequeña vibración en el campo de electrones, que podríamos estar tentados de identificar como un solo electrón, hay inevitablemente vibraciones acompañantes en el campo electromagnético, y de hecho en todos los otros campos con los que el electrón interactúa. Es como tocar una nota de piano en una sala de exposición con muchos pianos presentes; los otros instrumentos comenzarán a tararear suavemente junto con el original, causando un débil eco de cualquier nota que esté tocando. En el lenguaje de los diagramas de Feynman, esto significa que incluso una partícula aislada que se propaga a través del espacio está realmente acompañada por una nube circundante de partículas virtuales.

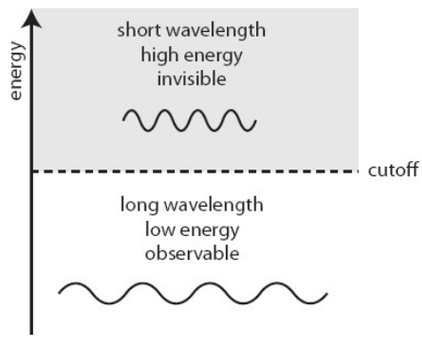


Como resultado, es útil distinguir entre los campos "desnudos" como se comportarían en un mundo imaginario en el que todas las interacciones se apagaran simplemente, y los campos "físicos" que van acompañados de otros campos con los que interactúan. Las infinitudes que se obtienen al girar ingenuamente una manivela en los diagramas de Feynman son simplemente el resultado de tratar de trabajar con campos desnudos, mientras que lo que realmente observamos son los físicos. El ajuste requerido para ir de uno a otro es a veces descrito informalmente como "restar del infinito para obtener una respuesta finita", pero eso es engañoso. Ninguna cantidad física es infinita, ni lo fue nunca; los infinitos que los pioneros de la teoría de los campos cuánticos lograron "esconder" eran simplemente artefactos de la gran diferencia entre los campos que interactúan y los que no. (Nos enfrentamos exactamente a este tipo de problema cuando intentamos estimar la energía del vacío en la teoría de campos cuánticos).

Sin embargo, la renormalización viene con importantes conocimientos físicos. Cuando queremos medir alguna propiedad de una partícula, como su masa o carga, la probamos viendo cómo interactúa con otras partículas. La teoría de campos cuánticos nos enseña que las partículas que vemos no son simples objetos puntuales; cada partícula está rodeada por una nube de otras partículas virtuales, o (más exactamente) por los otros campos cuánticos con los que interactúa. E interactuar con una nube es diferente a interactuar con un punto. Dos partículas que se chocan entre sí a alta velocidad penetrarán profundamente en las nubes de la otra, viendo vibraciones relativamente compactas, mientras que dos partículas que pasan lentamente se verán como (relativamente) grandes bolas hinchadas. En consecuencia, la masa o carga aparente de una partícula dependerá de la energía de las sondas con las que la miremos. Esto no es sólo una canción y un baile: es una predicción experimental, que se ha visto inequívocamente en los datos de la física de partículas.

La mejor manera de pensar sobre la renormalización no fue realmente apreciada hasta el trabajo del premio Nobel Kenneth Wilson a principios de los 70. Wilson se dio cuenta de que todos los infinitos en los cálculos del diagrama de Feynman provenían de partículas virtuales con energías muy grandes, correspondientes a procesos a distancias extremadamente cortas. Pero las altas energías y las distancias cortas son precisamente donde deberíamos tener menos confianza de que sabemos lo que está pasando. Los procesos con energías muy altas podrían involucrar campos completamente nuevos, que tienen masas tan altas que aún no las hemos producido en los experimentos. De hecho, el espacio tiempo en sí mismo podría descomponerse en distancias cortas, tal vez en la longitud de Planck.

Entonces, Wilson razonó, ¿qué tal si somos un poco más honestos, y admitimos que no sabemos lo que pasa con las energías arbitrariamente altas? En lugar de tomar bucles en los diagramas de Feynman y permitir que las energías de las partículas virtuales suban hasta el infinito, incluyamos un corte explícito en la teoría: una energía por encima de la cual no pretendemos saber lo que está sucediendo. El corte es en cierto sentido arbitrario, pero tiene sentido ponerlo en la línea divisoria entre las energías sobre las que tenemos un buen conocimiento experimental, y sobre las que no hemos podido echar un vistazo. Incluso puede haber una buena razón física para elegir un cierto límite, si esperamos que nuevas partículas u otros fenómenos se produzcan a esa escala, pero no sabemos exactamente cuáles serán.



Por supuesto, podría haber cosas interesantes en las energías más altas, así que al incluir un corte estamos admitiendo que no estamos obteniendo exactamente la respuesta correcta. Pero Wilson demostró que lo que obtenemos es generalmente más que suficiente. Podemos caracterizar con precisión cómo, y aproximadamente en qué medida, cualquier nuevo fenómeno de alta energía podría afectar al mundo de baja energía que vemos en realidad. Admitiendo nuestra ignorancia de esta manera, lo que nos queda es una teoría *de campo efectiva, una* que no presume de ser una descripción exacta de nada, pero que puede encajar exitosamente con los datos que realmente tenemos. Los teóricos modernos de campos cuánticos reconocen que todos sus mejores modelos son en realidad teorías de campo efectivas.

Esto nos deja con una situación de buenas y malas noticias. La buena noticia es que somos capaces de decir una enorme cantidad sobre el comportamiento de las partículas a bajas energías, usando la magia de la teoría de campo efectiva, incluso si no sabemos todo (o nada) sobre lo que está sucediendo a energías más altas. No necesitamos saber todas las respuestas finales para poder decir algo fiable y verdadero. Por eso podemos estar seguros de que las leyes de la física que gobiernan las partículas y las fuerzas que nos componen a ti y a mí y a nuestros entornos cotidianos son completamente conocidas: esas leyes toman la forma de una teoría de campo efectiva. Hay mucho espacio para descubrir nuevas partículas y fuerzas, pero o bien deben ser demasiado masivas (de alta energía) para haber sido producidas en experimentos, o bien interactúan con nosotros tan increíblemente débiles que no pueden tener un efecto en mesas y sillas y gatos y perros y otras piezas de la arquitectura de nuestro mundo de baja energía.

La mala noticia es que nos gustaría mucho aprender más sobre lo que realmente está pasando en las altas energías y las distancias cortas, pero la magia de la teoría de campo efectiva lo hace extremadamente difícil. Es bueno que podamos describir con precisión la física de baja energía sin importar lo que está pasando en las altas energías, pero también es frustrante porque esto parece implicar que no podemos inferir lo que está pasando allí arriba sin de alguna manera probarlo directamente. Por eso los físicos de partículas están tan enamorados de construir aceleradores de

partículas cada vez más grandes y de mayor energía; es la única forma fiable que conocemos para descubrir cómo funciona el universo a distancias muy pequeñas.

RECONOCIMIENTOS

Cada libro es una colaboración, y éste más que otros. Hay mucho que decir sobre la mecánica cuántica, y definitivamente hubo una tentación de decirlo todo. Podría haber sido un libro divertido de escribir, pero habría sido una tarea tediosa de leer. Debo a una variedad de generosos y perspicaces lectores su ayuda para que el manuscrito se convierta en algo manejable y, con suerte, en parte, divertido. Debo mencionar específicamente los útiles comentarios de Nick Aceves, Dean Buonomano, Joseph Clark, Don Howard, Jens Jäger, Gia Mora, Jason Pollack, Daniel Ranard, Rob Reid, Grant Remmen, Alex Rosenberg, Landon Ross, Chip Sebens, Matt Strassler y David Wallace. En formas que van desde la pequeña mención de algo en una conversación que luego terminó en el libro, hasta la gran lectura de cada capítulo y el ofrecimiento de ideas útiles, estas generosas personas ayudaron a rescatarme de escribir un libro que no hubiera sido tan bueno.

Quiero dar un agradecimiento especial a Scott Aaronson, que es el mejor lector de pruebas que un físico o un autor podría pedir, dando al texto una lectura completa y ofreciendo invariablemente una retroalimentación útil tanto en sustancia como en estilo. También mencionaré de nuevo a Gia Mora, porque fue inexplicablemente omitida de los reconocimientos de *The Big Picture*, y me siento mal por ello.

No hace falta decir que he aprendido mucho sobre la mecánica cuántica y el espacio tiempo de un gran número de personas extremadamente inteligentes a lo largo de los años, y su influencia impregna este libro incluso si no hablo específicamente de las palabras escritas aquí. Muchas gracias a David Albert, Ning Bao, Jeff Barrett, Charles Bennett, Adam Becker, Kim Boddy, Charles Cao, Aidan Chatwin-Davies, Sidney Coleman, Edward Farhi, Alan Guth, James Hartle, Jenann Ismael, Matthew Leifer, Seth Lloyd, Frank Maloney, Tim Maudlin, Spiros Michalakis, Alyssa Ney, Don Page, Alain Phares, John Preskill, Jess Reidel, Ashmeet Singh, Leonard Susskind, Lev Vaidman, Robert Wald, y Nicholas Warner, sin mencionar los muchos otros que sin duda olvido.

Gracias, como siempre, a mis alumnos y colaboradores por tolerar mis ocasionales ausencias mientras intentaba terminar el libro. Y gracias también a los estudiantes del 125C, el tercer trimestre del curso de Caltech de mecánica cuántica para principiantes, que toleraron que les enseñara sobre la decoherencia y el enredo en lugar de la conocida rutina de resolver la ecuación de Schrödinger una y otra vez.

Un millón de gracias a mi editor en Dutton, Stephen Morrow, cuya paciencia y perspicacia fueron más necesarias para este libro de lo que lo han sido en el pasado. Incluso me dejó incluir un capítulo entero en forma de diálogo, aunque es posible que lo haya desgastado. Un autor no podría imaginar un editor que se preocupara más por la calidad del producto final, y gran parte de la calidad aquí se debe a Stephen. Gracias también a mis agentes, Katinka Matson y John Brockman, que siempre hacen un proceso que podría ser potencialmente angustioso en algo tolerable, posiblemente incluso agradable.

Y el mayor agradecimiento de todos a Jennifer Ouellette, la compañera perfecta en la escritura y en la vida. No sólo me apoyó de innumerables maneras a lo largo del viaje, sino que se tomó el tiempo de su propio y exigente horario de escritura para revisar cada página aquí con cuidado y ofrecer una inestimable perspicacia y amor duro. No borré tanto como ella sugirió, y probablemente el libro es más pobre por ello, pero créeme, es mucho mejor de lo que era antes de que llegara.

Gracias también a Jennifer por traer a nuestras vidas a Ariel y Calibán, los mejores compañeros de escritura que un autor podría pedir. Ningún gato real fue sometido a experimentos de pensamiento durante la composición de este libro.

MÁS LECTURAS

Obviamente se ha escrito un gran número de libros sobre mecánica cuántica. Aquí hay algunos que son relevantes para los temas de este libro:

Albert, D. Z. (1994). *Quantum Mechanics and Experience.* Harvard University Press. Una breve introducción a la mecánica cuántica y al problema de la medición desde una perspectiva filosófica.

Becker, A. (2018). *¿Qué es real? La búsqueda inconclusa del significado de la física cuántica.* Libros básicos. Una visión general histórica de los fundamentos cuánticos, incluyendo alternativas a muchos mundos y los obstáculos que muchos físicos enfrentaron al pensar en estos temas.

Deutsch, D. (1997). *The Fabric of Reality.* Pingüino. Una introducción a muchos mundos, pero también mucho más, desde la computación a la evolución y el viaje en el tiempo.

Saunders, S., J. Barrett, A. Kent y D. Wallace. (2010). *Many Worlds? Everett, Teoría Cuántica y Realidad.* Una colección de ensayos a favor y en contra de Muchos Mundos.

Susskind, L. y A. Friedman. (2015). *Quantum Mechanics: El mínimo teórico.* Libros básicos. Una introducción seria a la mecánica cuántica, enseñada al nivel de un curso introductorio para estudiantes de física en una buena universidad.

Wallace, D. (2012). *The Emergent Multiverse: Teoría cuántica según la interpretación de Everett.* Oxford University Press. Un poco técnico, pero este es el libro de referencia estándar sobre muchos mundos.

REFERENCIAS

Prólogo

No tengas miedo

"Creo que puedo decir con seguridad": Ver R. P. Feynman (1965), *The Character of Physical Law,* MIT Press, 123.

Capítulo 2

La valiente formulación de la mecánica
cuántica austera

"Cállate y calcula": Ver N. D. Mermin (2004), "¿Podría Feynman haber dicho esto?" *Física Hoy* 57, 5, 10.

Capítulo 3

¿Por qué alguien pensaría esto?
Cómo llegó a ser la mecánica cuántica

"seis cosas imposibles": L. Carroll (1872), *A través del espejo y lo que Alice encontró allí,* Dover, 47.

"Lo dulce es por convención": Citado en H. C. Von Baeyer (2003), *Información: El nuevo lenguaje de la ciencia,* Weidenfeld & Nicolson, 12.

"muy revolucionario": Citado en R. P. Crease y A. S. Goldhaber (2014), *The Quantum Moment: Cómo Planck, Bohr, Einstein y Heisenberg nos enseñaron a amar la incertidumbre,* W. W. Norton & Company, 38.

"Me parece que hay una grave dificultad": Citado en H. Kragh (2012), "Rutherford, Radioactividad y el Núcleo Atómico", https://arxiv.org/abs/1202.0954.

"...había escrito un artículo loco: Citado en A. Pais (1991), *Niels Bohr's Times, en Physics, Philosophy, and Polity,* Clarendon Press, 278.

"Un verdadero cálculo de hechicero": Citado en J. Bernstein (2011), "Una historia cuántica", *The Institute Letter,* Institute for Advanced Study, Princeton.

"No me gusta": Citado en J. Gribbin (1984), *En busca del gato de Schrödinger: Física Cuántica y Realidad,* Bantam Books, v.

Capítulo 4

Lo que no puede ser conocido, porque no existe incertidumbre
y complementariedad

Para más información sobre el experimento de la doble rendija, ver A. Ananthaswamy (2018), *Through Two Doors at Once: The Elegant Experiment That Capture the Enigma of Our Quantum Reality,* Dutton.

Capítulo 5

Enredado en
las funciones de BlueWave
de muchas partes

A. Einstein, B. Podolsky, y N. Rosen (1935), "¿Puede considerarse completa la descripción cuántico-mecánica de la realidad?" *Physical Review* 47, 777.

Para una visión general del teorema de Bell y su relación con la EPR y la mecánica de Bohmian, ver T. Maudlin (2014), "What Bell Did", *Journal of Physics A* 47, 424010.

"prensa secular": Citado en W. Isaacson (2007), *Einstein: Su vida y el universo,* Simon & Schuster, 450.

D. Rauch et al. (2018), "Cosmic Bell Test Using Random Measurement Settings from High-Redshift Quasars", *Physical Review Letters* 121, 080403.

Capítulo 6

Dividiendo el UniversoDecoherencia
y mundos paralelos

Una buena biografía de Hugh Everett es P. Byrne (2010), *The Many Worlds of Hugh Everett III: Multiple Universes, Mutual Assured Destruction, and the Meltdown of a Nuclear Family,* Oxford University Press. Las citas de este capítulo son en gran parte de este libro y de A. Becker (2018), *What Is Real?* , Libros Básicos.

El artículo original de Everett (versiones larga y corta) y varios comentarios se pueden encontrar en B. S. DeWitt y N. Graham (1973), *The Many Worlds Interpretation of Quantum Mechanics,* Princeton University Press.

"Nada ha hecho más para convencerme": Citado en A. Becker (2018), *What Is Real?* Libros Básicos, 127.

H. D. Zeh (1970), "Sobre la interpretación de las mediciones en la teoría cuántica", *Foundations of Physics* 1, 69.

"La interpretación de Copenhague es irremediablemente incompleta": Citado en P. Byrne (2010), 141.

"¿Dividir?": Citado en P. Byrne (2010), 139.

"Para que no muera la discusión de mi trabajo": Citado en P. Byrne (2010), 171.

"condenado desde el principio": Citado en A. Becker (2018), 136.

"No puedo resistirme a preguntar": Citado en P. Byrne (2010), 176.

"Me doy cuenta de que hay un cierto valor": M. O. Everett (2007), *Things the Grandchildren Should Know,* Little, Brown, 235.

Capítulo 7

El orden y la aleatoriedad de donde
viene la probabilidad

"¿Por qué la gente dice": Citado en G.E.M. Anscombe (1959), *An Introduction to Wittgenstein's Tractatus, Biblioteca de* la Universidad Hutchinson, 151.

"medida de gordura": D. Z. Albert (2015), *After Physics, Harvard* University Press, 169.

W. H. Zurek (2005), "Probabilities from Entanglement, Born's Rule from Envariance", *Physical Review A* 71, 052105.

C. T. Sebens y S. M. Carroll (2016), "Self-Locating Uncertainty and the Origin of Probability in Everettian Quantum Mechanics", *British Journal for the Philosophy of Science* 69, 25.

D. Deutsch (1999), "Quantum Theory of Probability and Decisions", Actas de *la Real Sociedad de Londres* A455, 3129.

Para un examen exhaustivo del enfoque teórico de la decisión sobre la regla de Born, véase D. Wallace (2012), *The Emergent Multiverse*.

Capítulo 8

¿Este compromiso ontológico me hace parecer gorda?
Un diálogo socrático sobre los rompecabezas cuánticos

"equivocado e incluso un vicioso": K. Popper (1967), "Quantum Mechanics Without the Observer", en M. Bunge (ed.), *Quantum Theory and Reality. Studies in the Foundations Methodology and Philosophy of Science*, vol. 2, Springer, 12.

"una discusión completamente objetiva": K. Popper (1982), *Quantum Theory and the Schism in Physics,* Routledge, 89.

Para más información sobre la entropía y la flecha del tiempo, ver S. M. Carroll (2010), *From Eternity to Here: La búsqueda de la última teoría del tiempo,* Dutton.

"Preguntando cuántos mundos": D. Wallace (2012), *El multiverso emergente*, 102.

"A pesar del inigualable éxito empírico": D. Deutsch (1996), "Comment on Lock-wood", *British Journal for the Philosophy of Science* 47, 222.

Capítulo 9

Otras formas alternativas
a muchos mundos

"claramente siendo asignado": Citado en A. Becker (2018), *What Is Real?, Basic* Books, 213.

"Si no podemos refutar a Bohm": Citado en A. Becker (2018), 90.

"el papel es completamente insensato": Citado en A. Becker (2018), 199.

"Teléfono Everett": J. Polchinski (1991), "La Mecánica Cuántica No Lineal de Weinberg y la Paradoja de Einstein-Podolsky-Rosen", *Physical Review Letters* 66, 397.

Para más información sobre modelos de variables ocultas y colapsos dinámicos, véase T. Maudlin (2019), *Philosophy of Physics: Teoría Cuántica,* Princeton.

R. Penrose (1989), *La nueva mente del emperador: Concerniente a las computadoras, mentes y las leyes de la física,* Oxford.

"la paradoja de Einstein-Podolsky-Rosen se resuelve": J. S. Bell (1966), "Sobre el problema de las variables ocultas en la mecánica cuántica", *Reviews of Modern Physics* 38, 447.

"una superestructura ideológica superflua" y "metafísica artificial": Citado en W. Myrvold (2003), "On Some Early Objections to Bohm's Theory", *International Studies in the Philosophy of Science* 17, 7.

H. C. Von Baeyer (2016), *QBism: El futuro de la Física Cuántica, Harvard*.

"Hay de hecho" y "QBism saluda": N. D. Mermin (2018), "Making Better Sense of Quantum Mechanics", *Reports on Progress in Physics* 82, 012002.

C. A. Fuchs (2017), "On Participatory Realism", en I. Durham y D. Rickles, eds., *Information and Interaction,* Springer.

"La interpretación de Everett (en la medida en que es filosóficamente aceptable)": D. Wallace (2018), "Sobre la pluralidad de las teorías cuánticas: Quantum Theory as a Framework, and Its Implications for the Quantum Measurement Problem", en S. French y J. Saatsi, eds., *Scientific Realism and the Quantum*, Oxford.

Capítulo 10

El Lado HumanoViviendo
y pensando en un Universo Cuántico

M. Tegmark (1998), "La interpretación de la mecánica cuántica: ¿Muchos mundos o muchas palabras?" *Fortschrift Physik* 46, 855.

R. Nozick (1974), *Anarchy, State, and Utopia, Basic* Books, 41.

"Todo lo que la mecánica cuántica pretende proporcionar": E. P. Wigner (1961), "Observaciones sobre el problema mente-cuerpo", en I. J. Good, *The Scientist Speculates,* Heinemann.

Capítulo 11

¿Por qué hay espacio?
Emergencia y Localidad

Hablo más sobre la emergencia (y la teoría del núcleo) en S. M. Carroll (2016), *The Big Picture: Sobre los orígenes de la vida, el significado y el propio universo,* Dutton.

"Creo que mi padre": James Hartle (2016), comunicación personal.

Capítulo 12

Un mundo de vibraciones Teoría de
campo cuántico

"Es inconcebible que la materia bruta inanimada pueda": I. Newton (2004), *Newton: Escritos filosóficos*, ed. A. Janiak, Cambridge, 136.

P.C.W. Davies (1984), "Particles Do Not Exist," en B. S. DeWitt, ed., *Quantum Theory of Gravity: Ensayos en honor al 60º cumpleaños de Bryce DeWitt*, Adam Hilger.

Capítulo 13

Respirando en el espacio vacíoEncontrando
la gravedad dentro de la Mecánica Cuántica

Para más información sobre las implicaciones y limitaciones de la localidad, véase G. Musser (2015), *Spooky Action at a Distance: El Fenómeno que Reimagina el Espacio y el Tiempo y lo que significa para los Agujeros Negros, el Big Bang y las Teorías del Todo,* Farrar, Straus y Giroux.

"Uso más grasa cerebral": A. Einstein, citado por Otto Stern (1962), entrevista con T. S. Kuhn, Niels Bohr Library & Archives, American Institute of Physics, https://www.aip.org/history-programs/niels-bohr-library/oral-histories/4904.

"Tal vez el éxito del método Heisenberg": A. Einstein (1936), "Física y Realidad", reimpreso en A. Einstein (1956), *Out of My Later Years,* Citadel Press.

T. Jacobson (1995), "Thermodynamics of Space-Time: The Einstein Equation of State", *Physical Review Letters* 75, 1260.

T. Padmanabhan (2010), "Thermodynamical Aspects of Gravity: New Insights", *informa sobre el progreso en la Física* 73, 046901.

E. P. Verlinde (2011), "On the Origin of Gravity and the Laws of Newton", *Journal of High Energy Physics* 1104, 29.

J. S. Cotler, G. R. Penington, y D. H. Ranard (2019), "Locality from the Spectrum", *Communications in Mathematical Physics*, https://doi.org/10.1007/s00220-019-03376-w.

J. Maldacena y L. Susskind (2013), "Cool Horizons for Entangled Black Holes", *Fortschritte der Physik* 61, 781.

C. Cao, S. M. Carroll, y S. Michalakis (2017), "Space from Hilbert Space: Recovering Geometry from Bulk Entanglement," *Physical Review D* 95, 024031.

C. Cao y S. M. Carroll (2018), "Bulk Entanglement Gravity Without a Boundary: Towards Finding Einstein's Equation in Hilbert Space", *Physical Review D* 97, 086003.

T. Banks y W. Fischler (2001), "An Holographic Cosmology", https://arxiv.org/abs/hep-th/0111142.

S. B. Giddings (2018), "Quantum-First Gravity", *Foundations of Physics* 49, 177.

D. N. Page y W. K. Wootters (1983). "Evolution Without Evolution": Dynamics Described by Stationary Observables", *Physical Review D* 27, 2885.

Capítulo 14

Más allá de la holografía del espacio y el tiempo
, los agujeros negros y los límites de la localidad

La holografía, la complementariedad y la información sobre los agujeros negros se tratan en L. Susskind (2008), *The Black Hole War: My Battle with Stephen Hawking to Make the World Safe for Quantum Mechanics,* Back Bay Books.

A. Almheiri, D. Marolf, J. Polchinski y J. Sully (2013), "Black Holes: Complementariedad o cortafuegos?" *Journal of High Energy Physics* 1302, 062.

J. Maldacena (1997), "The Large-N Limit of Superconformal Field Theories and Supergravity", *International Journal of Theoretical Physics* 38, 1113.

S. Ryu y T. Takayanagi (2006), "Holographic Derivation of Entanglement Entropy from AdS/CFT", *Physical Review Letters* 96, 181602.

B. Swingle (2009), "Entanglement Renormalization and Holography", *Physical Review D* 86, 065007.

M. Van Raamsdonk (2010), "Building Up Spacetime with Quantum Entanglement", *General Relativity and Gravitation* 42, 2323.

Epílogo

Todo es cuántico

"Una maravilla de este tipo": A. Einstein (1949), Notas autobiográficas, Open Court Publishing, 9.

Apéndice

La historia de las partículas virtuales

Para más información sobre los diagramas de Feynman, ver R. P. Feynman (1985), *QED: La Extraña Teoría de la Luz y la Materia,* Princeton University Press.

INDICE

aceleración, 14-15, 48, 71, 257, 300
acción a distancia. *Ver la espeluznante acción* a distancia
Correspondencia AdS/CFT, 303-304
Fábulas de Esopo, 4-5
Aharonov, Yakir, 177
Albert, David, 141, 177
analogía de división de amebas, 123-124
amplitudes
descripción de, 19-20
probabilidades y, 86-87, 130-131, 142-146
distribución de probabilidad y, 187
desigual, 147-148
funciones de onda y, 33
momento angular, 55
Anscombe, Elizabeth, 129
anti-de Espacio para sentarse, 303, 304
área, 279, 284, 285
Aristóteles, 13, 15
flecha del tiempo, 158-159
átomos
austera mecánica cuántica y, 34
radiación de cuerpo negro y, 49-50
ramificación y, 138-139
compatibilismo y, 218
Dalton en, 45
descripción de, 18
electrones y, 45-46
como espacio vacío, 34, 73
entropía y, 158, 160, 276, 297-298
La teoría de la GRW y, 184
historia de, 45
materia y, 48
obedeciendo las reglas de la mecánica cuántica, 36
decadencia radioactiva de, 120
El modelo de Rutherford, 45-46, 52-55
teoría de la mecánica estadística, 29
mecánica cuántica austera (AQM), 32-36, 104, 245. *Véase también la formulación de* Everett de la mecánica cuántica; la teoría de muchos mundos

Banks, Tom, 285

Bauer, Edmond, 222
Bayes, Thomas, 136
Inferencia bayesiana, 198
Bayesianismo, 136
Bekenstein, Jacob, 297, 300
Entropía de Bekenstein-Hawking, 297-299
Bell, John, 30-31, 178, 190
Bell declara, 102-103
Teorema de Bell sobre el enredo, 102-106, 190, 233
Big Bang, 93-94, 113, 287
rompecabezas de información del agujero negro, 294
agujeros negros
complementariedad, 304-306
grados de libertad en el interior, 298-299
descripción de, 291-292
dinámico no local y, 296
emitiendo radiación, 293-296
entropía y, 297-299
evaporación, 295
horizonte de sucesos y, 293
en la relatividad general, 293, 301-302
la relatividad general y, 270, 297, 305
holografía para, 302-303
naturaleza de máxima entropía de, 300-301
paradigma de la membrana, 305
teorema de la no-clonación y, 296
partículas y, 291, 293-294
como región del espacio tiempo, 293, 299
representando a los estados de mayor entropía, 299-300
temperatura de, 293
radiación de cuerpo negro, 49-50
espectro de cuerpo negro, 50
Bohm, David, 30, 103, 178, 189-190
Mecánica de Bohmian
como formulación alternativa de la mecánica cuántica, 192-193
Einstein en, 194
construcción al azar de, 202
Heisenberg en, 194
no local y, 191
Oppenheimer en, 194
observación de partículas y, 41, 190-194
partículas momenta, 195
Pauli en, 194
problemas en, 194-195
principio de incertidumbre en, 195-196

funciones de onda en, 193
Bohr, Niels, 28, 31, 35, 54-58, 66-67, 74-75, 109
Boltzmann, Ludwig, 158-163, 276
Nacido, Max, 20, 33, 58-59, 65-66, 67
El gobierno nato...
descripción de, 19-20
en la teoría de Muchos Mundos, 146-148
localizaciones de partículas y, 191-193
probabilidades y, 130-131, 145, 167-168
como el teorema de Pitágoras, 87, 142
la incertidumbre de la autoubicación, 171
Bousso, Raphael, 300
cerebros, como sistemas físicos coherentes, 220
conteo de ramas, 142-144
ramificación
átomos y, 138-139
causa de, 213-214
la toma de decisiones y, 213-216
decoherencia y, 119-120, 122-123, 137-138, 183, 186
descripción de, 157-161
como mundos emergentes, 239
con cuatro mediciones consecutivas de giro, 134
en la teoría de Muchos Mundos, 169-172
La teoría de muchos mundos y, 138-140
como proceso no local, 171-172
sistemas cuánticos y, 216
la ecuación de Schrödinger y, 116
Bunn, Ted, 117

Cao, ChunJun (Charles), 285
imperativo categórico (Kant), 210
Cuevas, Carlton, 198
CFT (teoría de campo conformada), 303
la toma de decisiones. *Ver* libre albedrío
electromagnetismo clásico, 250, 269
mecánica clásica
átomos (*Ver átomos*)
campos (*Ver* campos)
Hamiltoniano, 64, 196, 239-240, 281-282
impulso en, 16, 70-71, 239
Newton y, 14-15
partículas (*Ver* partículas)
posición en, 16, 70-71, 239
reglas de, 21-22
universo cerrado, 287-288

nube de probabilidad, 19, 37
Coleman, Sidney, 129
teoría del colapso, 212
compatibilismo, 218
complementariedad, 74-79, 304-306
partículas compuestas, 46-47
Teoría de Campo Conformista (CFT), 303
conciencia, 122-123, 219-224
consecuencialismo, 210
Interpretación de Copenhague de la mecánica cuántica, 23, 57, 110, 116, 221
Teoría del núcleo, 230, 249, 252
constante cosmológica, 256-257
problema de la constante cosmológica, 258-259
credenciales, 136-137, 141-142, 211
...el espacio tiempo curvo. *Ver la* relatividad general

Dalton, John, 45 años
Davies, Paul, 256
de Broglie, Louis, 28, 30, 60, 62-65, 188
La teoría de Broglie-Bohm, 41. *Véase también la mecánica de* Bohmian
la toma de decisiones, como eventos clásicos, 213-216
teoría de la decisión, 148-149, 212
decoherencia
ramificación y, 119-120, 122-123, 137-138, 183, 186
descripción de, 117-120
vinculando la mecánica cuántica austera al mundo, 245
mundos múltiples y, 233-234
Penrose y, 186
como proceso rápido, 140
inversión de, 160
El experimento de pensamiento del gato de Schrödinger, 241-243
los mundos se interfieren entre sí, 157
Zeh y, 178-179
grados de libertad, 71, 262-263, 283-284, 298-299
Demócrito, 44
experimento de pensamiento demoníaco (Laplace), 16, 57, 63, 162-163, 235
Dennett, Daniel, 238-239
deontología, 210
determinismo, 216-218
Deutsch, David, 126, 148, 174, 194
DeWitt, Bryce, 126, 288
Dirac, Paul, 65
teoría de los mundos en desaparición, 117
distribución de probabilidades. *Ver distribuciones de* probabilidad
experimento de doble rendija, 75-79, 120-123, 191

dualismo, 223
localidad dinámica, 233, 281-282
no localidad dinámica, 296
modelos de colapso dinámico, 181-186

teoría de campo efectiva, 320-321
Einstein, Albert
Bohm y, 189-190
sobre la mecánica de Bohmian, 194
Debate de Bohr con, 28-29, 31, 109
Historia de la brújula, 310
en la constante cosmológica, 256-257
muerte de, 309
trabajo de relatividad general, 110, 112, 185, 230-231, 279-280. *Véase también* relatividad general
sobre el acercamiento de Heisenberg a la teoría cuántica, 271
en el Instituto de Estudios Avanzados, 110
etiquetando la mecánica cuántica como espeluznante, 11
propuesta cuántica ligera, 51-52, 60, 66
en la mecánica de la matriz, 59
teoría física, 102
Podolsky y, 101
el entrelazamiento cuántico y, 31
sobre la mecánica cuántica, 96, 102, 268
como pionero de la relatividad, 31
en el espacio tiempo, 269-270
teoría especial de la relatividad, 99, 233
sobre el principio de incertidumbre, 91, 109
Experimento de pensamiento de Einstein-Podolsky-Rosen (EPR), 96-102, 109, 191, 233, 285
carga eléctrica, 48n
campos eléctricos, 47-48
electricidad, 46
campo electromagnético
los diagramas de Feynman y, 315
gravitones y, 274
que conducen a fotones como partículas, 255
Maxwell en, 47-48
radiación electromagnética, 49-50, 66. *Ver también* luz
ondas electromagnéticas, 60, 249-250
electromagnetismo, clásico, 250, 269
electrones
átomos y, 45-46
Las órbitas cuantizadas de Bohr, 55-58, 66-67
nube de probabilidad, 19
definición de, 18
descubrimiento de, 45

experimento de doble rendija, 75-79
enmarañamiento y, 92, 120-122
los diagramas de Feynman y, 315
bandas de interferencia, 121
patrón de interferencia de, 77-78
en el hábitat natural, 18
en órbita, 46
partículas vs. ondas, 49, 75
resultados del giro, 80-83, 97-99
en superposición, 34
partículas elementales, 46-47
elementos de la realidad, 100
emergencia, 234-239
teorías empíricas, 155-156
espacio vacío
átomos como, 34, 73
energía de, 256-257
entropía y, 278
no hay partículas en, 260-261
vacío cuántico en, 256-257, 259-261
versión cuántica de, 302
como estacionario, 260
energía, 173, 184, 253, 256-257, 281-282, 291. *Ver también energía del* vacío
superposición enmarañada, 114-116
enredos. *Véase también* el teorema de Bell sobre el enredo
en acción, 94-95
para definir las distancias, 276-277
grados de libertad en, 263, 283-284
descripción de, 37-38, 91
en diferentes regiones del espacio, 261-265
Einstein y, 31
electrones y, 92, 120-122
entropía y, 160
con el medio ambiente, 118-119
Documento EPR sobre, 96-102, 109
ejemplos de, 91-92
en la teoría GRW, 182-183
impulso y, 92
naturaleza no local de, 178
teorema de la no-señalización, 97-99
en la teoría de campo cuántico, 249
estados cuánticos y, 118, 261-262
sistemas cuánticos y, 159-160
La ecuación de Schrödinger y, 38
sistema de dos qubits, 95-96

la energía del vacío y, 262-265
entropía de enredo, 160, 277, 283
flecha entrópica del tiempo, 158-159
entropía
área y, 285
flecha del tiempo, 158-159
átomos y, 158, 160, 276, 297-298
Bekenstein-Hawking, 297-299
de agujeros negros, 297-299
Fórmula de Boltzmann para, 158-163
en sistemas cerrados, 158
cortes, 278
de espacio vacío, 278
enredo, 160
horizonte de sucesos similar a, 297
límites de, 300
bajo, 159
de la característica objetiva a la subjetiva, 161-162
mecánica cuántica y, 276-278
de los subsistemas cuánticos, 277
dentro de la termodinámica, 279
en estado de vacío, 279
Probabilidades epistémicas, 135-140
epistemología, 30, 197-201
igual probabilidad, 144-146
regla de igualdad de probabilidades, 144-146
ER = conjetura de la EPR, 285n
ERP. *Ver el experimento de pensamiento de* Einstein-Podolsky-Rosen (EPR)
horizonte de sucesos, 293, 296-297, 301-305
Everett, Hugh
muerte de, 127
DeWitt y, 126
dejando la academia, 178
opciones de estilo de vida, 127
La formulación de muchos mundos y, 39
Petersen y, 125
sobre la gravedad cuántica, 111-114, 122-125, 272
sobre la inmortalidad cuántica, 207
sobre las mediciones cuánticas, 164-165
en el Grupo de Evaluación de Sistemas de Armas, 125-126
Everett, Mark, 127
La formulación de Everett de la mecánica cuántica
como el asalto a la foto de Bohr, 123-124
implicaciones de, 41
ingredientes para, 40-41

mediciones y, 104-105, 114-117, 123-125
resumen de, 38-40
tan simple y elegante, 202
Teléfono Everett, 180

medida de gordura, 141
Feynman, Richard, 2, 27n, 111, 314
Los diagramas de Feynman
descripción de, 314-316
campo electromagnético y, 315
corte explícito, 320
infinitos en, 319
bucle cerrado interno, 317-318
uso de los físicos de partículas, 315-317
partículas y, 314-316
renormalización, 318-319
partículas virtuales en, 316
métrica de campo, 273
campos
rasgo definitorio de, 47
definición de, 44
en la teoría GRW, 185
en la teoría de campo cuántico, 250-252
Quinta Conferencia Internacional Solvay, 27-28
propuesta de cortafuegos, 296-297n
Fischler, Willy, 285
fuerzas, ejemplos de, 16
formalismo de la mecánica cuántica, 30, 152-153
fundamentos de la mecánica cuántica
Albert y, 177
Teorema de Bell sobre el enredo, 102, 105
Bohr-Einstein debate sobre, 109
consenso sobre, 178
La propuesta de Everett, 111, 123
problemas de medición y, 17
Premio Nobel otorgado por, 59
respuesta de los físicos a, 196-197, 272, 311
Popper y, 157
el espacio tiempo y, 6
Franklin, Benjamin, 48n
libre albedrío, 216-218
frecuencia, medición, 50-51
Frecuencia, 133-135. *Véase también* Bayesianismo
Fuchs, Christopher, 198, 200

Los contadores Geiger como sistemas cuánticos, 221-222
la relatividad general. *Ver también gravedad cuántica*; relatividad especial
comportamiento del espacio tiempo en, 280
Big Bang y, 287
agujeros negros y, 270, 293, 297, 301-302, 305
El trabajo de Einstein en, 110, 112, 185, 230-231, 269-270
expansión del universo y, 270
como teoría de campo, 230, 250
gravitones y, 273-274
la gravedad cuántica del bucle y, 275
campo métrico, 273
El trabajo de Penrose sobre, 185-186
predicciones en, 156
cuantificación, 230-231, 270-271
reemplazando la teoría de Laplace, 248
la energía cero del universo y, 287-288
El trabajo de Wheeler en, 110
estado cuántico genérico, 282
geometría, 270-271, 306
Gerlach, Walter, 80 años
Ghirardi, Giancarlo, 181
escenario del "mundo fantasma", 120
Giddings, Steve, 285
gluones, 46
Evangelio de Mateo, 27n
Goudsmit, Samuel, 178
campos gravitatorios, 48, 248, 273-274
ondas gravitacionales, 53-54
gravitones, 273-274
gravedad, 6-7, 165, 185-186, 230, 267, 270-273. *Véase también* relatividad general; gravedad cuántica; teoría de la relatividad
Green, Michael, 274
Teoría de la GRW, 181-186, 196-197, 202-203

Habicht, Conrad, 52
Hamilton, William Rowan, 64 años
Formulación hamiltoniana de la mecánica clásica, 64, 196, 239-240, 281-282
Hammeroff, Stuart, 219
Hawking, Stephen, 113, 291-292, 293
versión h-bar, 56
Heisenberg, Werner, 28, 35, 57-59, 63, 67, 194
Corte de Heisenberg, 35
Método Heisenberg, 271
variables ocultas, 187-190
teorías de variables ocultas, 188-189, 190, 260

Espacio Hilbert, 85, 154, 164-166, 263, 306
Hobbes, omas, 218
principio holográfico, 302-304
Hooft, Gerard 't, 302
giro horizontal, 81-83
Comité de Actividades Anti-Americanas de la Cámara de Representantes, 189
la toma de decisiones humanas. *Ver* libre albedrío
la conciencia humana, 219-224
Hume, David, 177

idealismo, 223-225
imponiendo un límite, 258
indeterminismo, 216-218
infinitos, en los cálculos del diagrama de Feynman, 317-319
Instituto de Estudios Avanzados, Princeton, Nueva Jersey, 110
interferencia, 76-78, 120-122
interpretación de la mecánica cuántica. *Véase la interpretación de* Copenhague de la mecánica cuántica

Jacobson, Ted, 279
Jordan, Pascual, 58, 67
Jumpers (juego), 129

Kant, Immanuel, 210, 223

Laplace, Pierre-Simon, 16, 48, 235, 248
Lewis, David, 175
luz, 49-50
cuantos de luz (Einstein), 51-52, 60, 66
Observatorio de ondas gravitacionales LIGO, 53
principio de localidad, 99, 171-172, 232-233, 240, 292
Londres, Fritz, 222
bucle de gravedad cuántica, 275
mundos de baja probabilidad, 168

campos magnéticos, 47
"tomar una decisión", 213-216
Maldacena, Juan, 285n, 303
Proyecto Manhattan, 189
La teoría de muchos mundos. *Ver también Mecánica Cuántica Austera* (AQM); la formulación de Everett de la mecánica cuántica
adjuntando probabilidades a, 132
Nació el gobierno en, 146-148
ramificación y, 138-140, 169-170
Everett y, 39
simplicidad de la fórmula, 179

frecuentación y, 133-135
duración de la vida de una persona y, 139-140
como teoría local, 171-172
mundos de baja probabilidad, 168
medición y, 122, 169, 179
como moralmente relevante, 212-213
como proceso no local, 233
resumen de, 38-40
perspectiva cuántica de, 231-232
semillas de, 113
como simple y elegante, 203-204
función de onda en, 234
mecánica de la matriz, 57-59, 63, 65, 67
ondas de materia, 60, 62, 65
Matthew Effect, 27n
Maxwell, James Clerk, 47-48, 269
localidad de medición, 233
problema de medición de la mecánica cuántica
alterando la ecuación de Schrödinger para, 180-181
austera mecánica cuántica y, 36
sistemas de ondas colapsadas, 22-24, 112
la conciencia y, 224
consenso sobre, 17
resultados definitivos vs. indefinidos, 104-105
La teoría de Everett sobre, 104-105, 114-117, 123-125
La teoría de la GRW y, 184
Hume on, 177
La teoría de la ramificación de muchos mundos y, 179
Oppenheimer on, 178
enfoque de libro de texto, 242
paradigma de la membrana, 305
Mermin, N. David, 27, 198, 200, 201
Merton, Robert, 27n
métrico, campo, 273
Michalakis, Spyridon, 285
microtúbulos, 219-220
Galaxia de la Vía Láctea, 298-299
Misner, Charles, 113
modo del campo, 253-254
modos de la cuerda, 60-61
impulso
en la mecánica clásica, 16, 70-71, 239
enredos y, 92
posición y, 69
en las funciones de onda, 71-72

espacio de impulso, 240
moralidad, 210-213
mundos múltiples, 6, 39, 119, 180, 184, 233-234

naturaleza
la teoría cuántica de campo y, 229-230
mecánica cuántica que describe, 174-175
neurociencia, 224
neutrones, 46
nueva teoría cuántica, 57. *Ver también* mecánica cuántica
Newton, Isaac, 14-15, 24, 48, 239, 247-248
Gravedad newtoniana, 247-248
Mecánica newtoniana, 14-15
Las leyes de movimiento de Newton, 21, 195, 238
teorema de la no clonación, 296
proceso no local, 171-172, 178, 191, 233
utilitarismo sin sentido, 211
teorema de la no-señalización, 97-99
fisión nuclear, 110

universo observable, 94, 164-166, 182, 299, 301
observador, 122-123
La navaja de Occam, 152
vieja teoría cuántica, 52-56
compromisos ontológicos, 152
Oppenheimer, Robert, 178, 189-190, 194

Padmanabhan, Thanu, 280
Page, Don, 288
Parfit, Derek, 139
realismo participativo, 200
partículas
comportándose como gravitones, 274
agujeros negros y, 291, 293-294
Mecánica de Bohmian y, 41, 190-194
compuesto, 46-47
rasgo definitorio de, 47
definición de, 44
experimento de doble rendija, 75-79
de la Tierra, 236
elemental, 46-47
Diagramas de Feynman y, 314-316
en la teoría de campo cuántico, 250
virtual, 316
ondas vs., 49, 75

Pauli, Wolfgang, 28, 57, 63, 188, 194
Penrose, Roger, 185-186, 219
identidad personal a través del tiempo, 137-140
Petersen, Aage, 113, 124, 125
realidad física, 100-102
fisicalismo, 223, 224
física, 13-15
onda piloto, 187-188
teorías de ondas piloto, 194
Planck, Max, 50, 66
La constante de Planck, 50-51, 56
Podolsky, Boris, 96, 101
estados punteros, 244-245, 255
Polchinski, Joe, 180
Popper, Karl, 154-157
posición
en la física clásica, 16, 70-71, 239
impulso y, 69
en la mecánica cuántica, 70-71
positrones, diagramas de Feynman y, 314-315, 317
función de la onda de post-decoherencia, 234
problema de base preferida, 241-245
Principia Mathematica (Newton), 14
Probabilidades
amplitudes y, 86-87, 130-131, 142-146
Regla de nacimiento y, 130-131, 145, 167-168
credenciales y, 136-137
enfoque teórico de la decisión de, 212
epistémica, 135-140
igual probabilidad, 144-146
medida de gordura, 141
frecuentación y, 133-135
dado por las amplitudes al cuadrado, 131, 145, 147
incertidumbre de auto-localización y, 140-142, 149
distribuciones de probabilidad, 29-30, 187, 198
regla de probabilidad, 59
protones, 46
Teorema de Pitágoras, 86, 87, 142, 146-147, 273

flecha cuántica del tiempo, 158-159
Bayesianismo cuántico (QBism), 41, 198-201
el entrelazamiento cuántico. *Ver* entrelazamiento
la teoría cuántica de campos
enredado en, 249
campos en, 250-252

estado de energía más bajo de, 253
modo del campo, 253-254
naturaleza y, 229-230
partículas en, 250
estados puntuales de, 255
transiciones entre estados, 255
estado de vacío en, 254, 256-257
funciones de onda en, 250-252, 254
fluctuaciones cuánticas, 259-260
la gravedad cuántica. *Ver también* gravedad
cuestiones conceptuales, 272-273
construyendo la teoría de, 292
Everett en, 111-114, 122-125, 272
ubicación en el espacio, 196
bucle de gravedad cuántica, 275
número de estados cuánticos y, 165
problema del tiempo en, 288
el espacio tiempo y, 271-272
la teoría de cuerdas y, 274-275
desafíos técnicos de, 113
inmortalidad cuántica, 207-209
lógica cuántica, 74
proceso de medición cuántica, la conciencia y, 164-165, 222-224
mecánica cuántica
formulación alternativa de (*Ver mecánica de* Bohmian; teoría de GRW)
átomos y, 36
descartando el marco de la física clásica, 16-17
Einstein en, 96, 102, 268
Debate de Einstein-Bohr, 28-29, 31
ondas electromagnéticas, 249-250
entropía y, 276-278
falta de comprensión de, 24-25
como un sistema físico específico, 229
posición en, 70-71
presentaciones de, 13
reglas de, 22-23
el espacio tiempo y, 271-272
la relatividad especial y, 269
espeluznante de, 11-12
comprensión de, 1-4
violando la lógica, 73-74
generador de números aleatorios cuánticos, 205-206
estados cuánticos. *Ver también los estados de* Bell
la teoría de los mundos que desaparecen y, 117
enmarañamiento y, 118, 261-262

evolucionando bajo la ecuación de Schrödinger, 232, 243, 287-288
como fundamental, 241
El espacio de Hilbert y, 85, 165
principio de incertidumbre y, 73-74, 89
subsistemas cuánticos, 277
suicidio cuántico, 208
sistemas cuánticos
ramificación y, 216
división clásica con, 18, 35-36
enredado, 159-160
Geiger cuenta como, 221-222
La teoría de la GRW y, 182
descripción matemática de, 3
midiendo, 117-118
funciones de onda que describen, 21
dispositivo de maximización de utilidad cuántica (QUMaD), 211
vacío cuántico, 254, 256-257, 259-261
división cuántica/clásica, 35-36
quarks, 46
qubits, 83-86, 87, 164, 277

radiación, agujeros negros que emiten, 293-296
decadencia radioactiva, 120
emisiones radioactivas, 242
aleatoriedad, 294-295
generador de números aleatorios, 134
Teorema de Reeh-Schlieder, 264
región del espacio, 65, 156, 261-265, 280-284, 299-300
teoría de la relatividad, 30-31, 97-99, 112, 268-269. *Véase también* relatividad general; espacio tiempo; relatividad especial
renormalización, 318-319
Rimini, Alberto, 181
Rosen, Nathan, 96
Rutherford, Ernest, 45, 57
Átomo de Rutherford, 45-46, 52-55
Ryu, Shinsei, 303-304

Sagitario A*, 299
Schack, Rüdiger, 198
Schrödinger, Erwin, 28, 59, 62
El experimento de pensamiento del Gato de Schrödinger, 241-245
La ecuación de Schrödinger
alterando, 180
divisor de rayos, 206
ramificación y, 116

descripción de, 21
enmarañamiento y, 38
fórmula para, 63-64
Geiger cuenta y, 221
problemas de medición y, 180-181
estados cuánticos que evolucionan bajo, 232, 243, 287-288
tratamiento del espacio y el tiempo por, 286-287
tiempo definido en, 281
funciones de onda y, 21-22, 32, 64, 86, 94
Schwartz, John, 274
teorías científicas, características de, 155-156
segunda ley de la termodinámica, 158, 297
el yo, 137-139
incertidumbre de autoubicación, 140-142, 149, 171, 211
"¡Cállate y calcula!", 27
onda sinusoidal, 72, 253
Conferencia de Solvay, 27-31, 67, 96, 109, 188
el espacio y el tiempo
grados de libertad en, 263
localidad y, 240
resultados de las mediciones de, 85-86
en estado de superposición, 288-289
tratamiento de, 286-287
espacio tiempo
aplicando la mecánica cuántica a, 271-272
agujeros negros como regiones de, 293, 299
curvatura de (*Ver* relatividad general)
grados de libertad, 298
Einstein en, 269-270
fundamentos de la mecánica cuántica y, 6
geometría de, 270-271, 306
entropía máxima en, 300
métrica en, 273
la gravedad cuántica y, 271-272
unificado, 269
deformación de, 305
agujeros de gusano en, 285n
relatividad especial, 99, 170, 233, 269-270, 273. *Véase también relatividad* general
restricciones a la velocidad de la luz, 97-98, 99
giro, 79-83
resultados de los giros, 80-83, 87-89, 97-99, 101
sistema spin+apparato, 114-116
aparato de medición de espinazo, 118
colapso espontáneo de las funciones de onda, 181, 184-185, 192
acción espeluznante a distancia, 98, 99, 105, 247-248, 309

Modelo estándar de la física de partículas, 31, 180-181
teoría de la mecánica estadística, 29-30
Stern, Otto, 80
Experimento de Stern-Gerlach, 133
Stoppard, Tom, 129
teoría de cuerdas, 274-275
superdeterminismo, 104
superposiciones
descripción de, 34-38
de objetos macroscópicos, 116
El experimento de pensamiento del Gato de Schrödinger, 243
como mundos separados, 117
el espacio y el tiempo en, 288-289
tiempo en, 288-289
Susskind, Leonard, 285n, 302, 304-305
Swingle, Brian, 303-304
simetrías, 222

Teorema del Taj Mahal, 264
Takayanagi, Tadashi, 303-304
Tegmark, Max, 207
termodinámica, 158, 279, 297
Thomson, J. J., 45 años
Thorn, Charles, 302
Thorne, Kip, 111
experimento de pensamiento
Einstein-Podolsky-Rosen (EPR), 96-102, 109, 191, 233, 285
mundo ideal de, 260-261
Gato de Schrödinger, 241-245
tiempo. *Ver* el espacio y el tiempo
óxido de estaño, 44-45
sistema de dos qubits, 95-96
catástrofe ultravioleta, 50
principio de incertidumbre (Heisenberg)
Mecánica de Bohmian y, 195-196
descripción de, 70-73, 83
Einstein en, 91, 109
espacio vacío y, 260
localidad y, 240
estados cuánticos y, 73-74, 89
resultados de los giros y, 87-89, 101
unificado "tú", 138-139
función de onda universal, 113-114, 118-119
Divisor de Universo, 205-206
utilitarismo, sin tonterías, 211

utilidad, 210-212

la energía del vacío
aceleración cósmica y, 257
problema de la constante cosmológica, 258-259
del espacio vacío, 256-257
enmarañamiento y, 262-265
influencia gravitacional de, 256-257
medir, 50-51, 256
negativo, 304
positivo, 304
tamaño de, 257-258
estado de vacío
área y, 284
espacio vacío en, 278
entropía en, 279
entropía proporcional al área límite, 299-300
en la teoría de campo cuántico, 254, 256-257, 260, 264
Vaidman, Lev, 140
Van Raamsdonk, Mark, 303-304
campos vectoriales
campo eléctrico como, 47-48
campo magnético como, 47
vectores, 84, 86-88, 131
velocidad
en la física clásica, 16-17, 239
midiendo, 18-19
probabilidad de medir, 71
Verlinde, Erik, 280
giro vertical, 81-83
Observatorio de ondas gravitacionales de Virgo, 53
partículas virtuales, 316
volición, atribución, 218
von Neumann, John, 74, 159-160, 188-189, 276-278

Wallace, David, 129, 163, 202, 239
funciones de onda
como resumen, 79
amplitudes y, 33
asignando una amplitud, 33
Mecánica de Bohmian y, 193
Nacido el, 65-66
ramificación de, 137-138, 213-214
cambiando con el tiempo, 62-63
colapso de, 22-24, 33, 112, 219-220, 222

la conciencia y, 222
La vista de de Broglie, 65
descripción de, 19-21
personas distintas en las ramas de, 208-209
experimento de doble rendija, 120-123
Hamiltoniano, 64
influyéndose a sí mismo, 120
en la teoría de muchos mundos, 234
resultados de la medición de, 30-31
impulso y, 71-72
para una partícula, 94
papel de la onda piloto, 187-188
en la teoría de campo cuántico, 250-252, 254
sistemas cuánticos y, 21
de un qubit, 84
representando la densidad de masa en el espacio, 65
La ecuación de Schrödinger y, 21-22, 32, 64, 86, 94
para las partículas individuales, 71
espacio interior, 276
colapso espontáneo de, 181, 184-185, 192
para dos partículas, 91-93
unificando las partículas y los campos en, 44
como vectores, 86-88
mecánica de ondas, 59-62, 65, 67
la función de onda es todo lo que se ve, 33-34
ondas
experimento de doble rendija, 75-79
partículas vs., 49, 75
Grupo de Evaluación de Sistemas de Armas, 125-126
Weber, Tullio, 181
Weinberg, Steven, 180-181
Wheeler, John Archibald, 110-111, 123-126, 270-272, 281, 288
Ecuación de Wheeler-DeWitt, 288
Wilson, Kenneth, 319-320
The Wire (programa de televisión), 5
Wittgenstein, Ludwig, 129
Wootters, William, 288
agujeros de gusano, 285n

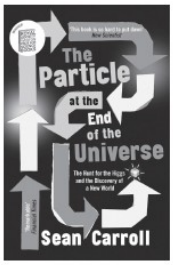
Zeh, Hans Dieter, 117, 178-179
energía cero, 256, 287-288

SOBRE EL AUTOR

SEAN CARROLL es un físico teórico del Instituto Tecnológico de California. Sus investigaciones se han centrado en la cosmología, la gravitación, la teoría de campo, la mecánica cuántica, la mecánica estadística y los fundamentos de la física. Ha recibido numerosos premios, incluyendo el Andrew Gemant Award del Instituto Americano de Física, el Royal Society Prize for Science Books, y una beca Guggenheim. Sus otros libros incluyen *From Eternity to Here: La búsqueda de la última teoría del tiempo*; *La partícula en el fin del universo: La Caza del Higgs y el Descubrimiento de un Nuevo Mundo*; y *El Gran Cuadro: sobre los orígenes de la vida, el significado y el propio universo.* También es el anfitrión del podcast semanal de *Mindscape*.

www.preposterousuniverse.com

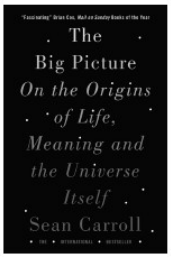
JOIN THE HUNT FOR THE PARTICLE AT THE END OF THE UNIVERSE



Winner of the Royal Society Winton Prize for Science Books
A Best Book of the Year for the *Guardian*, *Financial Times* and *New Scientist*

It was the universe's most elusive particle, the linchpin for everything scientists dreamed up to explain how physics works. It had to be found. But projects as big as CERN's Large Hadron Collider don't happen without incredible risks – or occasional skulduggery. In the definitive account of the greatest science story of our time, acclaimed physicist Sean Carroll reveals the insights, rivalry, and wonder that fuelled the Higgs discovery, and takes us on a riveting and irresistible ride to the very edge of physics today.

TAKE IN THE BIG PICTURE...



"Sean Carroll examines what it means to exist on this speck of dust in a possibly infinite universe. It's fascinating to see a real working physicist thinking these things through and trying to come to a conclusion."
Professor Brian Cox, *Mail on Sunday*, Best Books of the Year

"An extraordinary synthesis of science and philosophy."
Financial Times

Where are we? Who are we? Do our beliefs, hopes and dreams hold any significance out there in the void? Can human purpose and meaning ever fit into a scientific world view?

From Darwin and Einstein to the origins of life, consciousness and the universe itself, award-winning author Sean Carroll combines cosmos-sprawling science and profound thought in a quest to explain our world. An insightful and erudite journey through the realms of knowledge, nature's laws and the most profound questions about life, death and our place in it all, *The Big Picture* is destined to sit alongside the works of our greatest thinkers. Carroll demonstrates that while our lives may be forever dwarfed by the immensity of the universe, they can be redeemed by our capacity to comprehend it and give it meaning.

Un libro de Oneworld

Publicado por primera vez en Gran Bretaña, la República de Irlanda y Australia por Oneworld Publications, 2019

Este ebook publicado en 2019

Copyright © Sean Carroll 2019

El derecho moral de Sean Carroll a ser identificado como el autor de esta obra ha sido reivindicado por él de acuerdo con la Ley de Derechos de Autor, Diseños y Patentes de 1988

Todos los derechos reservadosDerechos de autor
en virtud del Convenio de BernaUn
registro de la CIP para este título está disponible en la Biblioteca Británica

ISBN 978-1-78607-633-5eISBN
978-1-78607-634-2

Arte interior: textura de superposición en dificultades © gooddesign10/Shutterstock

Publicaciones de Oneworld
10 Bloomsbury Street
Londres WC1B 3SR
Inglaterra

Manténgase al día con los últimos libros, ofertas especiales y contenido exclusivo de Oneworld con nuestro boletín de noticias

Regístrese en nuestro sitio web
oneworld-publications.com